

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MONITORAMENTO DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA A UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

MARZELY GORGES

FLORIANÓPOLIS, MAIO DE 1992

MONITORAMENTO DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

MARZELY GORGES

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO

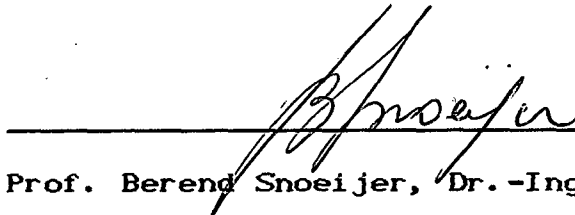
FABRICAÇÃO, APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr.-Ing.

Orientador



Prof. Berend Snoeijer, Dr.-Ing

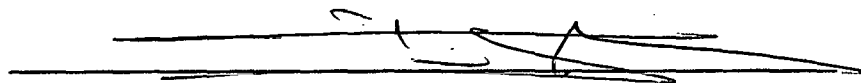
Coordenador da Pós-Graduação em

Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA:




Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr.-Ing.



Prof. João Fernando Gomes de Oliveira,

Dr. Eng. Mec.



Prof. Lourival Boehs, Dr. Eng. Mec.

A Zelindro Ismael Farias, pelo
carinho, atenção, compreensão
e dedicação em todos os dias
de nosso relacionamento.

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Walter Lindolfo Weingaertner, orientador competente e grande amigo, pelo brilhantismo na escolha de novos trabalhos e pelo inestimável apoio na elaboração, bem como na divulgação desta dissertação.

Ao prof. Erich Caspar Stemmer pela amizade, pela determinação em seus objetivos, bem como pela implementação do Curso de Engenharia Mecânica na UFSC.

Aos meus queridos papai Modesto e mamãe Eni pelo apoio e pela confiança em seus filhos.

A empresa PROMETEC GmbH, Aachen, pelo auxílio na obtenção de literatura e informações técnicas sobre o monitoramento.

A empresa EMBRACO S.A, Joinville - Santa Catarina, pela colaboração no desenvolvimento de ensaios.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e desenvolvimento (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos.

Ao prof. Carlos Alberto Selke, coordenador do Projeto RHAE/CNPq.

Ao amigo doutorando Antônio Salvador da Rocha pelas sugestões e pelo incentivo.

Ao doutorando Rolf Bertrand Schroeter pelas sugestões e pelo auxílio nas traduções.

Ao amigo estagiário Luis Antônio Müller pelo auxílio na pesquisa bibliográfica e nos ensaios.

A banca examinadora, Prof. Dr. Eng. João Fernando Gomes de Oliveira e Prof. Dr. Eng. Lourival Boehs.

Ao Grupo de Monitoramento, em especial Ivan da Costa Pereira Filho, pelo apoio.

Aos técnicos João Gonçalves Filho e Hugo Vivanco, a graduanda Daniela Aguida Bento e Tyrone A. Patel pela execução dos desenhos.

Ao mestrando Paulo de Oliveira e ao graduando Carlos C. Gommersbach pelo auxílio na tradução.

Aos colegas de curso, professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica.

Aos integrantes do Laboratório de Mecânica de Precisão, em especial à secretária Rosimar Maria Franzói e a bibliotecária Vera Lúcia Quadros Duarte.

As bibliotecárias Angélica Gorges Amaral e Regina Gorges pela orientação.

Ao querido irmão Amilton José Gorges pelo apoio logístico.

As queridas Famílias de Juarez Amaral e de Zelindro Farias.

A todos estes, e aqueles que não foram citados, mas não foram esquecidos, dedico a esperança de que este trabalho não tenha sido em vão, e de que bons frutos venham a ser colhidos dele.

INDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS DO TRABALHO.....	3
3	ESTADO DA ARTE.....	5
4	DESCRIÇÃO DAS FORMAS E DOS MECANISMOS DE DESGASTE E SUA AÇÃO SOBRE AS GRANDEZAS CORRELACIONADAS.....	17
4.1	Ferramenta de Geometria Definida.....	18
4.1.1	Formas de Desgaste.....	19
4.1.2	Mecanismos de Desgaste.....	26
4.1.3	Material da Ferramenta.....	38
4.1.3.1	Influência do Material da Ferramenta sobre a Força de Usinagem.....	38
4.1.4	Influência da Temperatura na Vida da Ferramenta.....	39
4.1.5	Efeitos do Fluido de Corte sobre o Desgaste.....	43
4.1.6	Vibrações.....	45
4.1.7	Dimensões do Corte.....	47
4.1.8	Influência do Material da Peça no Desgaste da Ferramenta.....	48
4.2	Ferramentas de Geometria Não Definida.....	49
4.2.1	Formas de Desgaste.....	51
4.2.2	Mecanismos de Desgaste.....	52

4.2.3	Influência do Fluido de Corte no	
	Desgaste do Rebolo.....	58
4.2.4	Influência do Tipo do Rebolo sobre	
	o Desgaste.....	61
4.2.5	Efeito do Empastamento do Rebolo.....	64
5	DESENVOLVIMENTO E TENDÊNCIAS DO MONITORAMENTO	
	E CONTROLE DO PROCESSO DE USINAGEM.....	65
5.1	Sensores.....	68
5.1.1	Princípio Físico dos Sensores.....	69
5.1.2	Aplicação Técnica dos Sensores.....	70
5.1.3	Sistemas Multi-Sensores.....	98
5.1.4	Sensores Inteligentes.....	100
5.2	Condicionamento do Sinal.....	106
5.3	Estratégias.....	106
5.3.1	Sistemas de Controle Adaptativo.....	106
5.3.2	Sistemas de Diagnose.....	107
5.3.3	Sistemas de Monitoramento.....	107
5.4	Modelos.....	107
5.4.1	Monitoramento com Limites Estáticos.....	108
5.4.1.1	Técnica Teach-In.....	108
5.4.1.2	Técnica Reconhecimento de Padrões.....	118
5.4.2	Monitoramento com Limites Dinâmicos.....	122
5.4.3	Sistemas Multi-Modelos.....	130
5.5	Sistemas Comerciais.....	132
6	ANÁLISE PARA IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO.....	133
6.1	Critérios para a Escolha de um Sistema Adequado.....	133
6.2	Fase Introdutória do Sistema de Monitoramento.....	136

6.3 A Produtividade é Decisiva.....	139
7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA A CONTINUIDADE DO TRABALHO.....	144
7.1 Conclusões.....	144
7.2 Sugestões para a Continuidade do Trabalho.....	145
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	146
BIBLIOGRAFIA AUXILIAR.....	158
ANEXO 1.....	163
ANEXO 2.....	166

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

- 1: Processos de usinagem mais utilizados na fabricação
de peças pela indústria brasileira.....3

CAPÍTULO 3

- 2: Sistema de Controle Adaptativo para Torneamento.....6
3: Estrutura de Sistemas de Controle Automático de Processo.....8
4: Causas para as paradas técnicas de máquinas ferramentas.....13
5: Reconhecimento óptico da forma do cavaco.....14
6: Monitoramento da colisão em robô.....16

CAPÍTULO 4

- 7: Representação esquemática da cunha de corte.....18
8: Formas de Desgaste de uma ferramenta de corte.....19
9: Comportamento esquemático da largura da marca de
desgaste em dependência do tempo de corte.....20
10: Influência da profundidade de corte sobre o comportamento
das forças de usinagem e do desgaste médio e máximo
dos flancos na usinagem a quente com 3,15 kW de
aquecimento.....21
11: Influência do desgaste de cratera sobre as componentes
de força de usinagem para uma ferramenta com flanco
reafiado.....24
12: Formas de cavaco.....26
13: Influência dos mecanismos de desgaste no desgaste total
da ferramenta.....27

14: Esquema da formação do gume postiço.....	28
15: Força de avanço e força passiva como função da velocidade de corte no torneamento com diversos tipos de metal duro...	28
16: Deformação plástica.....	30
17: Subdivisão das fraturas das ferramentas.....	32
18: Dispersão relativa da componente da força de usinagem para quebras de ferramentas de metal duro.....	35
19: Fissuras transversais.....	36
20: Fissuras longitudinais.....	37
21: Comportamento típico das curvas de força ao longo da vida para os diversos materiais de ferramenta.....	40
22: Influência da velocidade de corte e do avanço no desgaste da ferramenta.....	41
23: Influência do fluido de corte no desgaste.....	44
24: Representação esquemática do início de corte na retificação.....	49
25: Medição de desgaste em rebolos.....	52
26: Mecanismos de desgaste no grão ligante.....	52
27: Influência da taxa de retificação específica sobre a velocidade de desgaste radial, bem como os mecanismos de desgaste correspondentes.....	55
28: Dependência funcional da velocidade de desgaste radial, corrigida da taxa de retificação específica e da velocidade de corte.....	56
29: Dependência entre a velocidade de desgaste radial em relação a taxa de retificação específica.....	56
30: Desgaste de quina de um reboło em dependência da velocidade de corte.....	57

31: Volume de desgaste específico do rebolo em dependência da taxa de retificação e do fluido de corte empregado.....	59
32: Influência da disposição do número de tubeiras de limpeza sobre a qualidade da superfície na retificação plana.....	60

CAPÍTULO 5

33: Custos de usinagem por produto como função da velocidade de corte:	
a) Usinagem convencional	
b) Usinagem CNC.....	66
TABELA 1: Condições atuais de monitoramento no processo de usinagem (tempos críticos e não críticos).....	67
34: Estrutura de um sistema de supervisão.....	68
35: Processo de medição para a determinação direta do desgaste de uma ferramenta para o torneamento.....	72
36: Métodos de medição para a determinação indireta do desgaste durante o torneamento.....	76
37: Monitoramento do dressamento e controle da qualidade no processo de retificação "Center-Less".....	77
38: Construção e sensibilidade de frequência de um sensor.....	79
39: Análise do sinal de ruído.....	80
40: Análise comparativa da utilização de um sensor de força com um sensor de ruído no reconhecimento do fim da vida da ferramenta com broca de aço rápido não revestida.....	81
41: Fases do processo de retificação.....	82
42: Monitoramento do processo de dressamento.....	83

43: Esquema de um torno CNC equipado com um sensor de potência. O condutor de suprimento do motor de avanço do eixo Z é passado através do anel do sensor de potência.....	84
44: Plataforma piezelétrica para medição de forças.....	89
45: Esquema funcional do monitoramento de uma ferramenta em um torno.....	89
46: Anéis de medição para medição de força em um torno 4 eixos CNC.....	91
47: Extensômetro piezelétrico para medição de força montado sobre a caixa do revólver.....	92
48: Variações de montagem de buchas de medição piezelétrica....	93
49: Sensor de avanço instalado em árvore não rotativa.....	94
50: Tipos de sensores de avanço.....	95
51: Corte transversal de um sensor indutivo magnético.....	96
52: Princípio de funcionamento de um sistema de monitoramento que utiliza o sensor indutivo magnético.....	98
53: Estrutura básica de um sistema inteligente de usinagem....	102
54: Exemplo de um sistema inteligente de usinagem.....	104
55: Posição dos limites em um ciclo de trabalho no sistema de monitoramento de processo.....	110
56: Reação do sistema de monitoramento em caso de quebra e desgaste da ferramenta.....	111
57: Integração de um sistema de monitoramento em um torno....	112
58: Integração do sistema de monitoramento em uma retificadora.....	113
59: Fases do Processo de Retificação.....	115

60: Reação do monitoramento de processo no faíscamento com desgaste da ferramenta, com degeneração do processo e colisão.....	116
61: Reação do sistema de monitoramento em erros de dressamento.....	117
62: Comportamento da força de usinagem e modelo de referência (parte superior: quebra da ferramenta de metal duro, parte inferior: quebra de uma ferramenta de cerâmica) a) Padrão de referência b) Reconhecimento da quebra.....	118
63: Comportamento das componentes de usinagem ao longo da utilização de uma ferramenta. Parte superior - Força de corte (a), força de avanço (b) e força passiva (c). Parte inferior: Valor calculado pela unidade de monitoramento para o desgaste.....	119
64: Sobrematerial da peça - quebra da ferramenta. Ferramenta de cerâmica.....	120
65: Monitoramento de quebra de ferramenta pela detecção de ondas ultrassônicas características (esquema funcional) a) máquina b) unidade de fixação c) peça d) sensor e) árvore da máquina-ferramenta f) broca g) fluido de corte h) pulsor i) unidade de monitoramento.....	122
66: Ferramenta e peça após uma quebra total.....	123
67: Desenvolvimento de forças em uma quebra total.....	124
68: Ajuste dos limites variáveis a um sinal de força.....	125
69: Estratégia de reconhecimento da quebra e quebra total por ultrapassagem do limite superior.....	126

70: Estratégia de reconhecimento da quebra e quebra total sem ultrapassagem do limite superior.....	127
71: Estratégia para reconhecimento do final de vida.....	129
TABELA 2: Algumas possibilidade para combinar modelos e sensores.....	131
72: Exemplo de um sistema multi-sensor e um sistema multi-modelos.....	132

CAPÍTULO 6

73: Comparação entre sensores de força.....	149
---	-----

ANEXO 2

74: Sistema MIMATIC E-2.....	172
------------------------------	-----

RESUMO

MONITORAMENTO DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

As exigências crescentes da manutenção da qualidade dos componentes, da redução considerável dos tempos improdutivos decorrentes da diminuição do número de paradas provocadas pelas trocas excessivas das ferramentas, bem como da quebra de ferramentas, e, ainda, a redução dos custos de manutenção preventiva e corretiva da máquina ferramenta exigem a utilização de sistemas de monitoramento. As informações sobre o estado da máquina - ferramenta - peça são obtidas de forma indireta, pela avaliação de características do processo, como a força de usinagem para os processos de torneamento, furação e fresamento ou a análise automática do nível de pressão acústica para os processos de retificação, dressamento e furação.

ABSTRACT

MANUFACTURING PROCESS MONITORING

The growing requirements for the maintenance of the quality of components, for the considerable reduction in the improductive time caused by the decrease in the number of breaks due to excessive tool changes, as well as for the tool breakage and the reduction of the machine tools preventive and corrective, maintenance costs require the use of monitoring systems. The information about the status of machine tool/piece are obtained indirectly, through the evaluation of the process characteristics, such as the cutting force for turning, drilling and milling, or the automatic analysis of the noise level for grinding, dressing and drilling.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Na fabricação mecânica convencional com remoção de cavaco, o operador, considerado um verdadeiro artesão, reconhece através dos princípios de observação ótico e acústico o estado da máquina ferramenta e perturbações do processo, e em consequência de sua experiência pode atuar sobre o processo ou mesmo desligar a máquina se for necessário [1,2].

Mas a exigência, por parte do mercado consumidor, de produtos com maior nível de qualidade com custos reduzidos levou a indústria a procurar e utilizar, de forma mais extensiva, as reservas potenciais do parque industrial. Por exemplo, o uso intensivo de fluido de corte, exigiu o encapsulamento do espaço de trabalho. O uso de novos materiais de ferramentas, levou a um aumento nas velocidades de corte, e a grande variedade de diferentes tipos de ferramentas [1-6] significou uma sobrecarga ao operador no controle do andamento do processo, bem como no caso de perturbações súbitas, como quebras de ferramentas. Consequentemente o julgamento clássico tornou-se cada vez mais difícil [1,2].

Os técnicos em usinagem, então, começaram a se utilizar do método das vidas médias (valores de experiência), porém para evitar a quebra com um grau razoável de segurança, os valores médios de vida eram reduzidos por taxas respectivas de segurança. O resultado disto era anti-econômico, já que aumentava o número

de trocas de ferramenta, aumentava os tempos secundários e de máquina parada, assim como utilizava de forma insuficiente o potencial da ferramenta de corte [2]. Da mesma forma, o uso de sistemas de banco de dados com um espectro representativo era igualmente insatisfatório. Nos processos de usinagem, estes dados concretos não podiam ser transferidos para condições alteradas de usinagem, função das variações nos tipos de processos de usinagem, materiais de peças ou materiais de ferramentas [7].

Assim, cresceu a necessidade de sistemas automáticos para controlar ou monitorar os processos de usinagem que garantissem o reconhecimento em tempo hábil de perturbações no processo, bem como a ação automática de uma medida contrária a falha, provocando a redução ou até mesmo a eliminação dos danos consequentes dessas perturbações, que na grande maioria das vezes levam a redução dos tempos improdutivos das máquinas ferramenta a um mínimo, minimizando ou eliminando os custos consequentes.

Com essa transformação, as máquinas passaram a apresentar maiores recursos operacionais, tornando-se mais flexíveis, permitindo a manufatura integrada por computador (Computer Integrated Manufacturing - CIM), e consequentemente possibilitando a usinagem de peças mais complexas, com maior precisão, segurança e num tempo muito menor [3,5-16].

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo contribuir para a introdução da tecnologia de monitoramento para os processos de usinagem mais utilizados na indústria brasileira (figura 1), seja o torneamento como processo de usinagem com ferramenta de geometria definida e a retificação como processo de usinagem com ferramenta de geometria não definida.

Inicialmente, serão analisadas as principais causas que levam a perturbações no decorrer do processo, isto é, desgaste na ferramenta de corte, quebra da ferramenta, forma dos cavacos, colisão, e vibrações regenerativas.

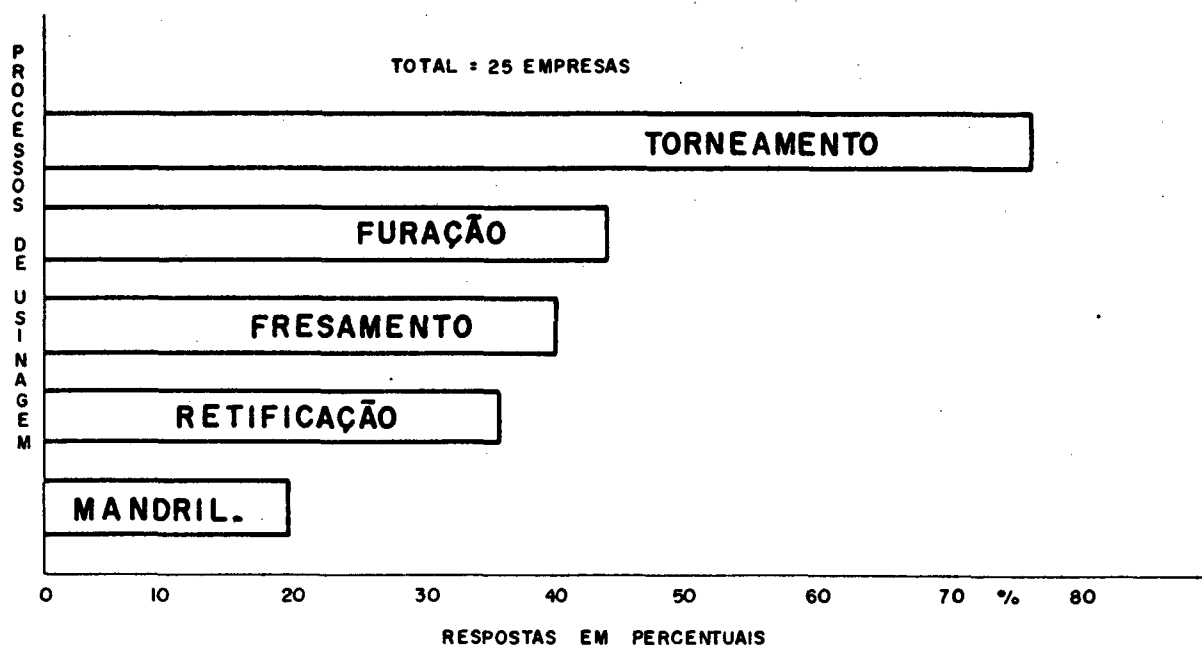


FIGURA 1 : Processos de usinagem mais utilizados na fabricação de peças pela indústria brasileira [3].

Cabe aqui também uma revisão de usinabilidade correlacionando os mecanismos de desgaste com a variação resultante da força de usinagem.

Uma vez analisadas as causas realizar-se-á a apresentação crítica de soluções de processos de medição adequados para estes fatores perturbadores, bem como das estratégias de monitoramento correspondentes.

Por último, será apresentada a apresentação de uma análise crítica dos sistemas de monitoramento existentes no mercado mundial.

CAPÍTULO 3

ESTADO DA ARTE

Foram realizados grandes esforços nas décadas de 60, 70 e, em parte, ainda, na década de 80 para que os sistemas de controle automático pudessem vir a solucionar integralmente os problemas de usinagem, inclusive os de otimização do processo, da geometria e de resultados gerais de usinagem.

No começo da década de 80 iniciou-se uma reestruturação da idéia dos sistemas de controle automático e o monitoramento, que anteriormente era um subproduto do sistema de controle automático, passou a ser visto com uma importância maior e, de uma forma geral, pode-se até dizer que ele se tornou palavra-chave dentro da fabricação.

De uma forma geral, os sistemas de controle automático desenvolvidos até hoje para a aplicação em máquinas ferramenta podem ser classificados da seguinte maneira [18]:

- Controle Adaptativo Automático (Automatic Adaptive Control - AAC)

ou apenas

- Controle Adaptativo (Adaptive Control - AC)

que subdivide-se em:

- Sistema de Controle Adaptativo Limite (Adaptive Control Constrain - ACC)
- Sistema de Controle Adaptativo Otimizado (Adaptive Control Optimization - ACO)

e

- Monitoramento

O sistema de Controle Adaptativo Automático [6.18-19] é um sistema que identifica automaticamente e continuamente o desempenho em linha de uma atividade (um processo ou operação, por exemplo) medindo uma ou mais variáveis da atividade; comparando grandezas medidas com outras grandezas medidas, grandezas calculadas, valores estabelecidos ou limites; e modificando a atividade por ajustagem automática de uma ou mais variáveis para melhorar ou otimizar o desempenho, como pode ser visto, por exemplo, para o torneamento na figura 2.

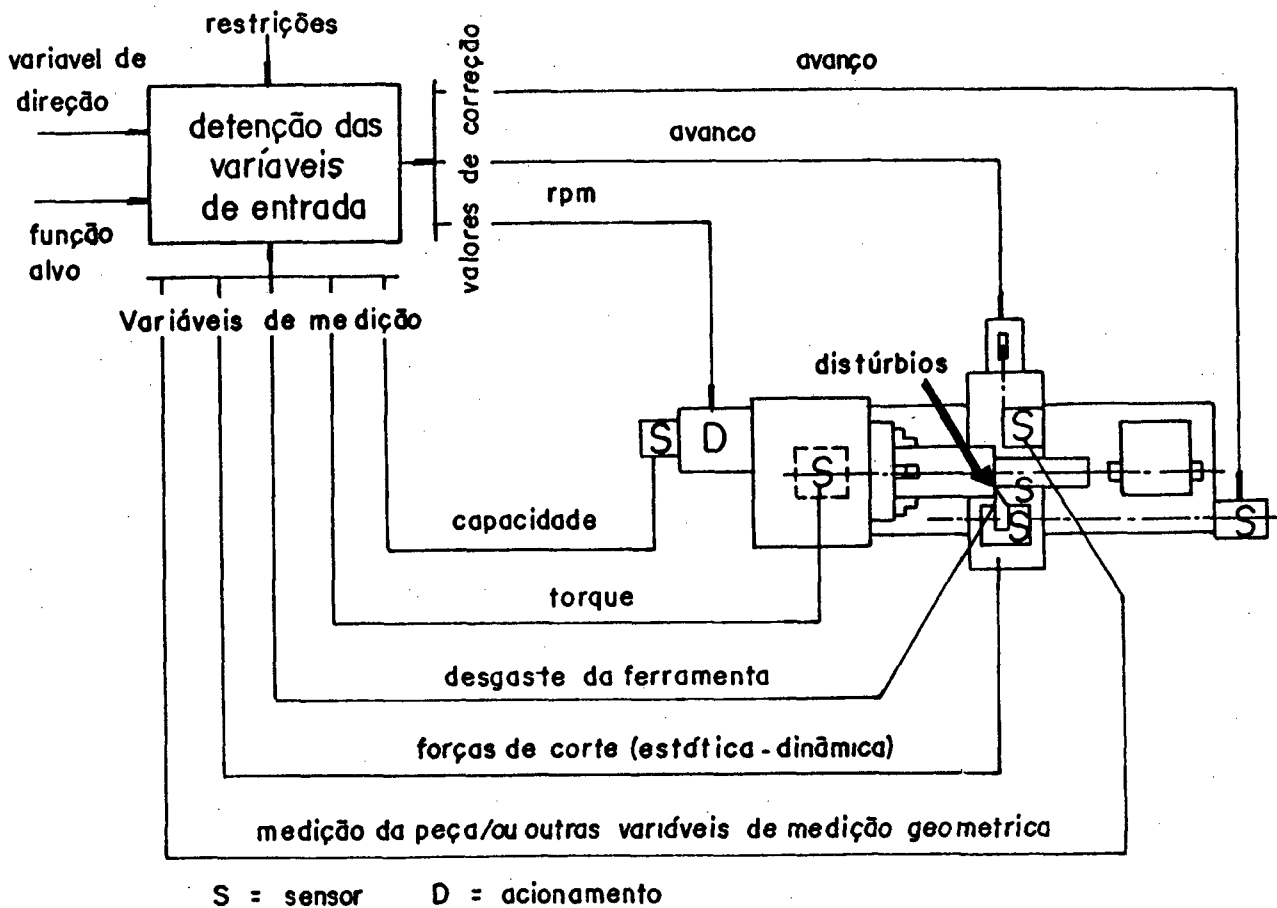


Figura 2: Sistema de Controle Adaptativo para torneamento [19].

No sistema de controle ACC o aumento da produtividade da máquina ferramenta é obtido através da medição em processo, pela utilização de valores limites para os parâmetros da máquina ferramenta tais como torque, força ou potência, com o objetivo de obter-se o melhor aproveitamento da potência útil da máquina ferramenta e ferramenta e garantia de qualidade uniforme da peça [18].

O sistema ACO é um sistema de controle no qual a produtividade ótima da máquina ferramenta é obtida através da medição em processo e ajuste dos parâmetros de operação [6,18-19] com a finalidade de se conseguir:

- Mínimos custos de fabricação
- Mínimo tempo de fabricação
- Remoção de cavaco otimizada para qualidade constante da peça.

O monitoramento é definido por Kluft [1] como sendo o reconhecimento de uma perturbação ou de um erro com indicação imediata desta informação.

O ciclo de monitoramento se fecha quando o sistema de monitoramento reconheceu um erro da variação do valor característico e analisou uma perturbação. O resultado da análise implicará em diversas medidas:

- Tolerável: Manter as condições do processo,
- Condições toleráveis condicionalmente: Corrigir o estado do processo,
- Não tolerável: Interromper o processo imediatamente.

As medidas sugeridas pelo sistema de monitoramento podem ser efetuadas diretamente ou realizadas após um sinal óptico ou

acústico pelo operador. Em ambos os casos os parâmetros de entrada do processo são alterados ou a máquina é desligada. Desta forma, obtém-se a redução dos custos pela minimização de danos devido a quebras de ferramentas e dos danos consequentes.

De acordo com estas definições conclui-se que os sistemas de controle e monitoramento apresentam estruturas semelhantes como pode ser visto na figura 3. Uma importante característica é que para todos os sistemas o fluxo de sinal é fechado.

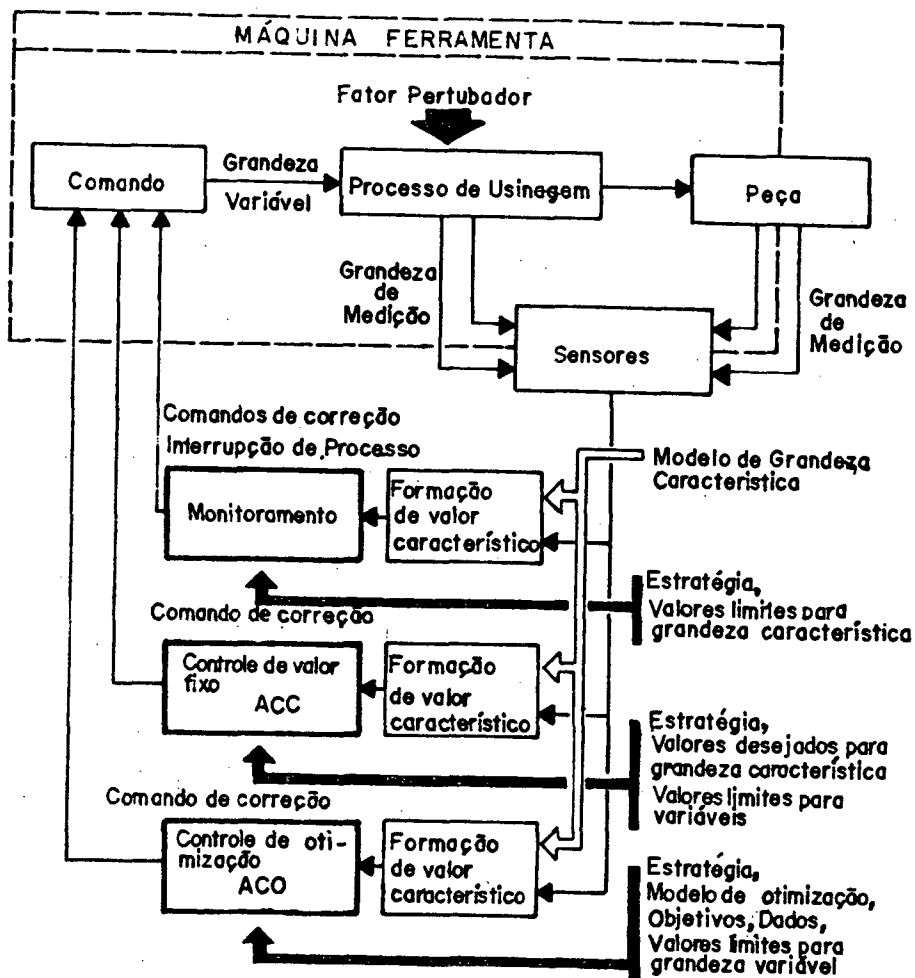


FIGURA 3: Estrutura de Sistemas de Controle Automático de Processo [1].

O estado do processo é identificado com o auxílio de sensores que simultaneamente modificam objetivamente os parâmetros de entrada da máquina ferramenta. Desta forma, os resultados negativos de fatores perturbadores, como qualidade ruim da peça, o não aproveitamento econômico da máquina ferramenta e ferramenta, bem como a danificação desses, são evitados.

Todos os sistemas mostrados na figura 3 exigem a determinação de características que permitem descrever de forma adequada o estado da ferramenta ou da máquina ferramenta. Como características podem ser empregadas a medição direta do desgaste na ferramenta de corte ou na medição indireta a força de usinagem, a rugosidade e a medida da geometria da peça. Estes modelos podem apresentar tendências idênticas, no entanto, só podem ser comparados através do emprego de modelos matemáticos empíricos.

As primeiras sugestões para a instalação de sistemas automáticos para o monitoramento e controle de processo de fabricação foram realizadas em 1933 [20]. Estas idéias só foram utilizadas, para sistemas de controle de processo, após a introdução do comando numérico e da disponibilidade de sistemas de avanço controlados. Desta forma, só em 1960 [1,19] foi possível desenvolver sistemas de controle para máquinas ferramenta, nos quais o processo de usinagem representava uma parte deste.

No ano de 1972 [19], todos os processos de controle essenciais e estratégias de otimização, conhecidos atualmente, para o processo de torneamento já tinham atingido um estado tecnológico avançado. Isso incluía as estratégias de controle

para otimização de custos, para o controle da potência, da força e do torque, para distribuição automática de corte, para a cilindricidade do torneamento e a detecção do início do corte.

Nos anos seguintes, os resultados obtidos para o torneamento foram transportados para os processos de manufatura de fresamento, retificação e furação profunda [19].

No entanto, vários fatores contribuíram para o retardo da implementação dos sistemas de controle adaptativo (AC) [1]. Entre eles podemos citar :

- Empenho técnico muito grande;
- complexidade muito grande;
- perturbações no sistema muito frequentes;
- inexistência de sensores confiáveis e baratos;
- realização apenas em máquinas-ferramentas CN;
- insegurança do usuário pela grande variação nos sistemas;
- custos de investimentos muito elevados, maiores que o limite de aceitação da indústria que é, normalmente, estimado em 3 % do valor da máquina ferramenta [21]; e
- falta de comprovação abrangente e objetiva da economia do processo.

Além disso para o ACO:

- Empenho técnico, complexidade, sensível a perturbações e custos de investimentos ainda mais elevados que para ACC; e
- otimização de valores fixos externos na maioria dos casos é suficiente.

Ressaltando-se, ainda, que o volume de desenvolvimento dos ACC foi bem maior que para os ACO [18], numa relação de 8:1.

Na década de 70, dava-se uma maior ênfase a um processo

otimizado em relação ao tempo, exigindo um sistema de controle adaptativo. Atualmente, verificou-se a necessidade de maior segurança do processo e, em geral, por essa razão necessita-se de monitoramento [1,4].

Porém, o início do desenvolvimento de sistemas de monitoramento só se deu no ano de 1976 [1] na Alemanha, com o objetivo de substituir os sistemas de controle considerados bastante complexos, com alto custo de investimento e de baixa confiabilidade.

Na década de 80, já estavam disponíveis no mercado mundial sistemas de monitoramento para uma grande variedade de processos [22].

A utilização desses sistemas para o reconhecimento rápido de colisões em máquinas ferramenta, para o reconhecimento da quebra ou desgaste de ferramentas, em sua maior parte, para os processos de torneamento e de furação são hoje o estado da arte em uma linha de produção automática de alto nível [9,22]. Para o fresamento e para a retificação estes sistemas ainda se encontram numa fase introdutória [9]. Também na soldagem, no corte [23] e na têmpera por laser [9,24,25], sistemas de monitoramentos correspondentes se tornam necessários e estão atualmente sendo implementados [9].

As vantagens econômicas [1] pela introdução de sistemas de monitoramento podem ser muitas. Por exemplo, o seguro de uma máquina ferramenta é aproximadamente duas vezes o seguro de um bom carro, na faixa de setenta de mil marcos alemães. Esse seguro pode ser reduzido consideravelmente se houver uma garantia para a companhia seguradora que nesta máquina ferramenta não haverá danos de grande monta garantido por um sistema que reconheça em

tempo hábil uma colisão ou uma destruição decorrente de uma quebra de uma ferramenta.

Mesmo que para um sistema de monitoramento que tenha um custo máximo de trinta mil marcos alemães por eixo monitorado, em consequência da utilização plena das vidas da ferramenta, bem como pela maximização do tempo de uso da máquina ferramenta que são decorrentes do menor número de trocas de ferramentas, do menor número de colisões e do menor número de paradas com respectivos tempos de manutenção da máquina ferramenta, o tempo médio de amortização é de 2 a 3 anos e um tempo mínimo de amortização pode chegar de 8 a 12 meses.

A utilização de sistemas de monitoramento tem como objetivo aumentar a vantagem econômica em relação a produção convencional com o menor gasto possível. Isto é obtido através do monitoramento do processo reconhecendo perturbações que ocorrem com muita frequência ou que levam a paradas prolongadas da máquina ferramenta [1]. Além disso, os sistemas devem ser ajustáveis tanto para diferentes tipos de máquinas, como para processos de usinagem [22].

O resultado de um levantamento de dados sobre as "causas" (no sentido técnico de perturbações) para as paradas das máquinas ferramenta pode ser mostrado na figura 4. Em 1966 Takeyama [26] concluiu que para todos os processos de usinagem as causas que tem a maior parcela de participação nestas paradas são:

- Fim de vida da ferramenta,
- Quebra da ferramenta, e
- Cavacos.

Daí pode-se observar que as causas de parada intrínsecas da máquina ferramenta representam apenas 3 % e por isso são pouco

utilizáveis para o monitoramento e algumas causas como o intervalo de recreio ou exigências de segurança são de pouca importância como fatores causadores de paradas de máquinas ferramenta.

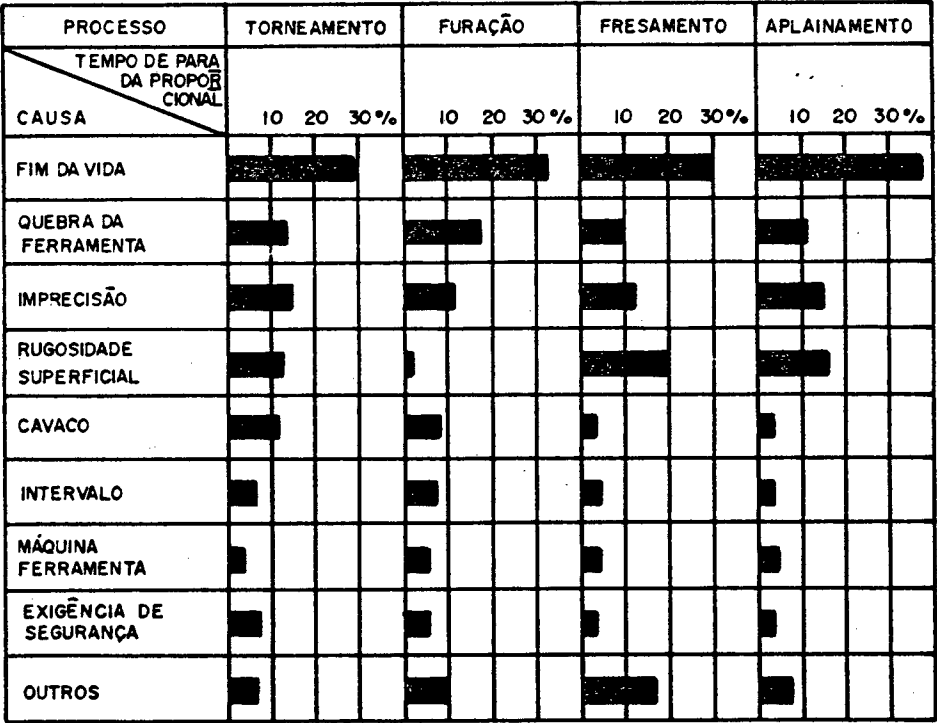


FIGURA 4: Causas para as paradas técnicas de máquinas ferramenta [1].

Os fatores imprecisão e rugosidade superficial da peça não devem ser utilizados porque, juntamente com o desgaste da ferramenta, são influenciados por alterações térmicas, deformações elásticas, pelo comportamento dinâmico do sistema máquina ferramenta - ferramenta - peça e por erros de posicionamento da peça na máquina ferramenta [1].

De acordo com a literatura, o reconhecimento do fim de vida da ferramenta e a quebra da ferramenta são de fundamental importância, no entanto, o fim de vida da ferramenta possibilita uma redução de custos e de tempos improdutivos mais elevados do que o reconhecimento da quebra da ferramenta.

Desta maneira, a análise sobre o desgaste nas ferramentas é de fundamental importância para a implementação do monitoramento do fim da vida da ferramenta, bem como da quebra da ferramenta.

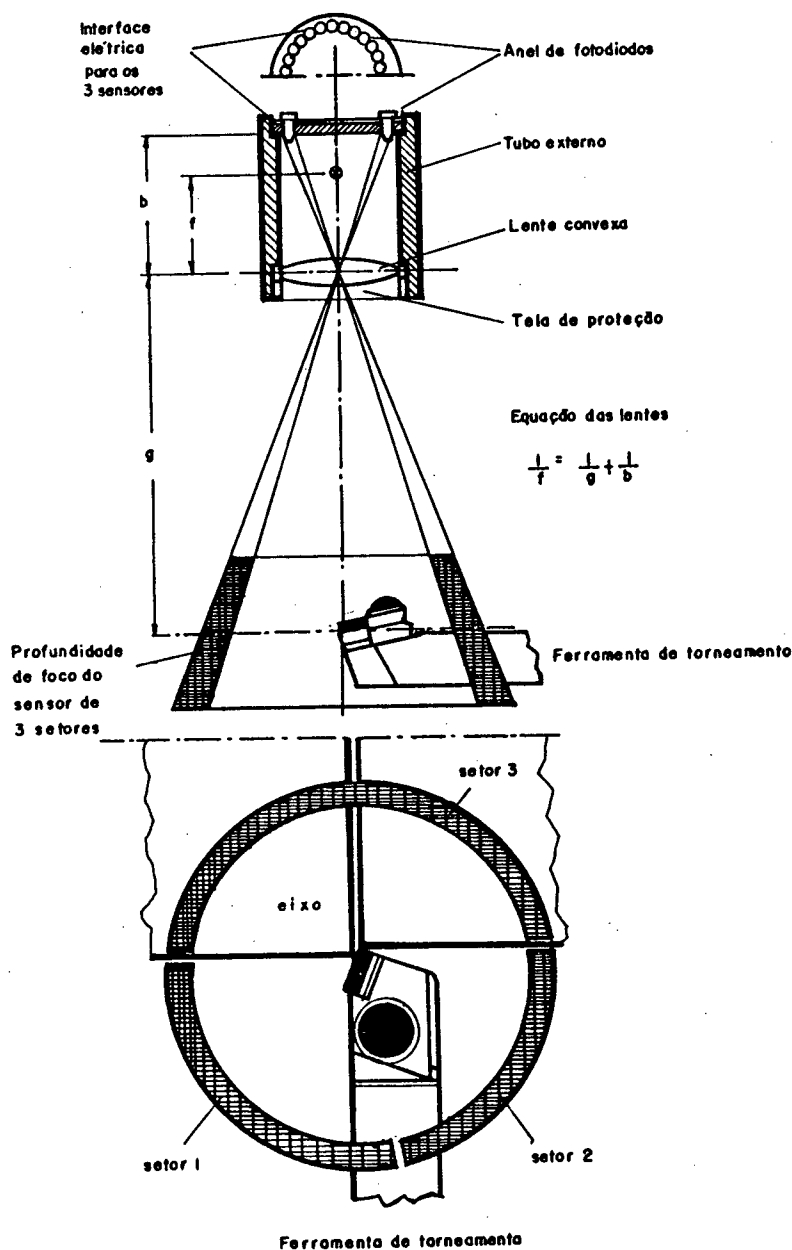


Figura 5: Reconhecimento óptico da forma do cavaco [27].

Em um processo de fabricação dominado, a forma dos cavacos geralmente está bem caracterizada. Durante toda a fase de usinagem de um componente os cavacos normalmente apresentam a mesma forma não perturbando de uma forma genérica o processo. Apenas em situações de escolha não adequada da geometria da ferramenta, do material da ferramenta e do material da peça, os cavacos se tornam fator perturbador dominante. A literatura [02] não faz muitas referências ao monitoramento de cavacos, o que deixa concluir que essa necessidade não é tão relevante quanto as demais anteriormente citadas. Um dos poucos exemplos de sistemas de monitoramento de cavaco é mostrado na figura 5 onde pode ser observado um sistema óptico que através da forma do cavaco reconhece o estado da ferramenta. Este sistema foi apresentado em 1980 em um stand do AWK no WZL em Aachen, R.F.A. [27].

A análise de Takeyama pode ser considerada incompleta para as exigências de uma unidade de fabricação moderna com máquinas ferramenta de última geração. Na análise até agora apresentada as trocas de ferramentas nas máquinas de comando numérico eram na grande maioria feitas manualmente dando um tempo hábil muito grande ao operador para reconhecer uma eventual colisão. Com o aumento da tecnologia das máquinas ferramenta a troca automática das ferramentas passou a ser parte integrante nas máquinas ferramenta e os tempos de troca tornaram-se cada vez mais reduzidos. Em 1979, o tempo médio de troca de uma ferramenta de corte em um centro de usinagem já se situava na faixa de 14 s. As máquinas atuais efetuam esta mesma troca na faixa de 1 a 3 s. Em decorrência da troca automática da ferramenta de corte e também da diminuição drástica do tempo de troca da ferramenta, o

operador não tem mais condições de acompanhar a troca e consequentemente não dispõe de tempo hábil para efetuar o desligamento da máquina ferramenta no caso de uma colisão desta com a peça ou com a estrutura da própria máquina ferramenta. Esta necessidade foi reconhecida praticamente pela maioria dos fabricantes de sistemas de monitoramento para processos de usinagem e esta idéia encontra-se amplamente difundida nos usuários destes sistemas. Uma outra possibilidade para a aplicação de um sistema de monitoramento de colisão são os robôs conforme mostrado na figura 6.

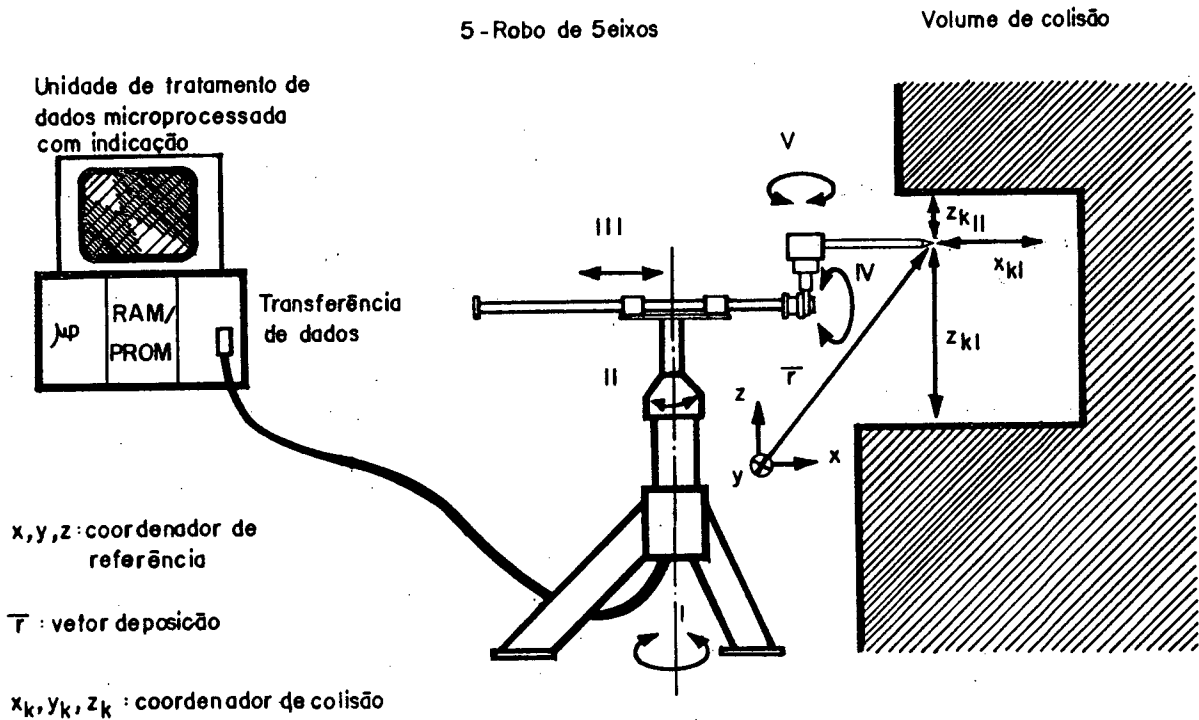


FIGURA 6: Monitoramento da colisão em robô [28].

CAPÍTULO 4

DESCRIÇÃO DAS FORMAS E DOS MECANISMOS DE DESGASTE E SUA AÇÃO SOBRE AS GRANDEZAS CORRELACIONADAS

Na revisão bibliográfica tornou-se claro que as principais causas perturbadoras analisadas por sistemas de monitoramento são o desgaste da ferramenta, a quebra da ferramenta, a colisão da ferramenta, a inexistência de peça ou ferramenta na máquina para proceder a usinagem e, de uma forma secundária, o monitoramento dos cavacos.

Para poder decidir sobre qual sistema de monitoramento ou qual a grandeza que deve ser monitorada e de que forma deve ser efetuado o monitoramento da grandeza perturbadora é necessário que se conheçam profundamente os mecanismos que levam a alteração da grandeza monitorada.

Consequentemente será feita uma análise das formas e dos mecanismos de desgaste que ocorrem em ferramentas de corte, das causas de lascamentos de ferramenta de corte, bem como dos fatores que levam a alterações na forma dos cavacos. Além disso serão discutidos os principais fatores que levam a colisões em uma máquina de comando numérico.

A análise do desgaste será feita para os processos de usinagem mais empregados pela indústria, seja para os processos com ferramentas de geometria definida e, em seguida, para o processo com ferramentas de geometria não definida.

4.1 Ferramenta de Geometria Definida

Durante a usinagem a ferramenta de corte é submetida a esforços que dependendo das condições de usinagem, do material da peça e do material da ferramenta levam ao desgaste da ferramenta de corte. Vários mecanismos de desgaste se superpõem e, na maioria da vezes, não podem ser analisados isoladamente. Para poder avaliar a influência do desgaste sobre grandezas correlacionadas, como a força de usinagem, será feita uma análise do estado dos diversos mecanismos correlacionados com as variações provocadas na grandeza correlacionada.

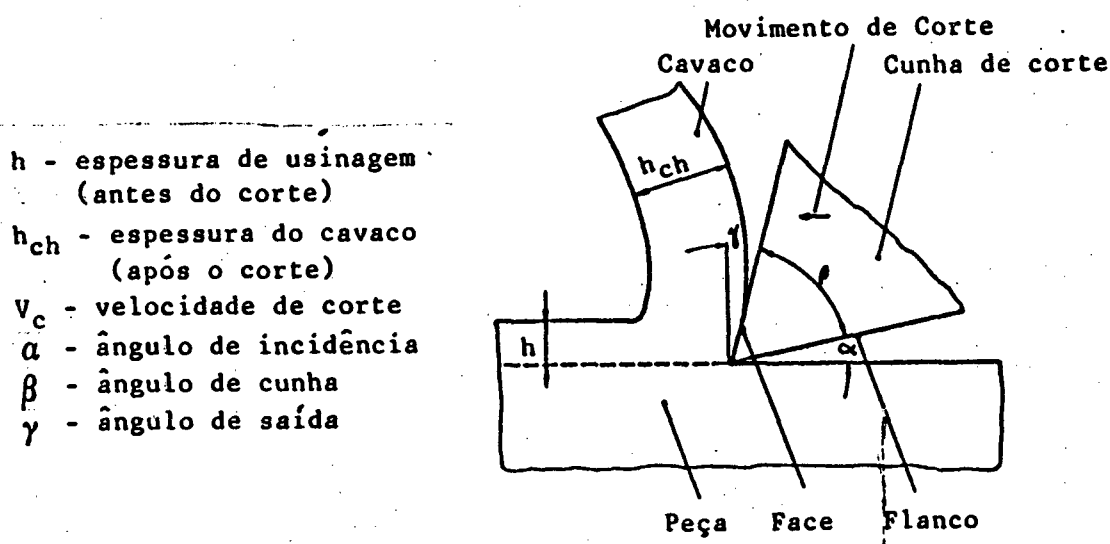


FIGURA 7: Representação esquemática da cunha de corte [29].

4.1.1 Formas de Desgaste

As formas de desgaste mais frequentes ocorrem na face e no flanco principal da ferramenta, conforme mostrado na figura 8; no flanco secundário pode ocorrer um desgaste de oxidação que tem menor influência sobre as condições de uso da ferramenta [30].

Na prática, os desgastes mais medidos e mais verificados são o desgaste de flanco e, para velocidades de corte elevadas, o desgaste de cratera. O valor máximo de desgaste de flanco ou de cratera podem ser empregados como critérios de fim de vida [30].

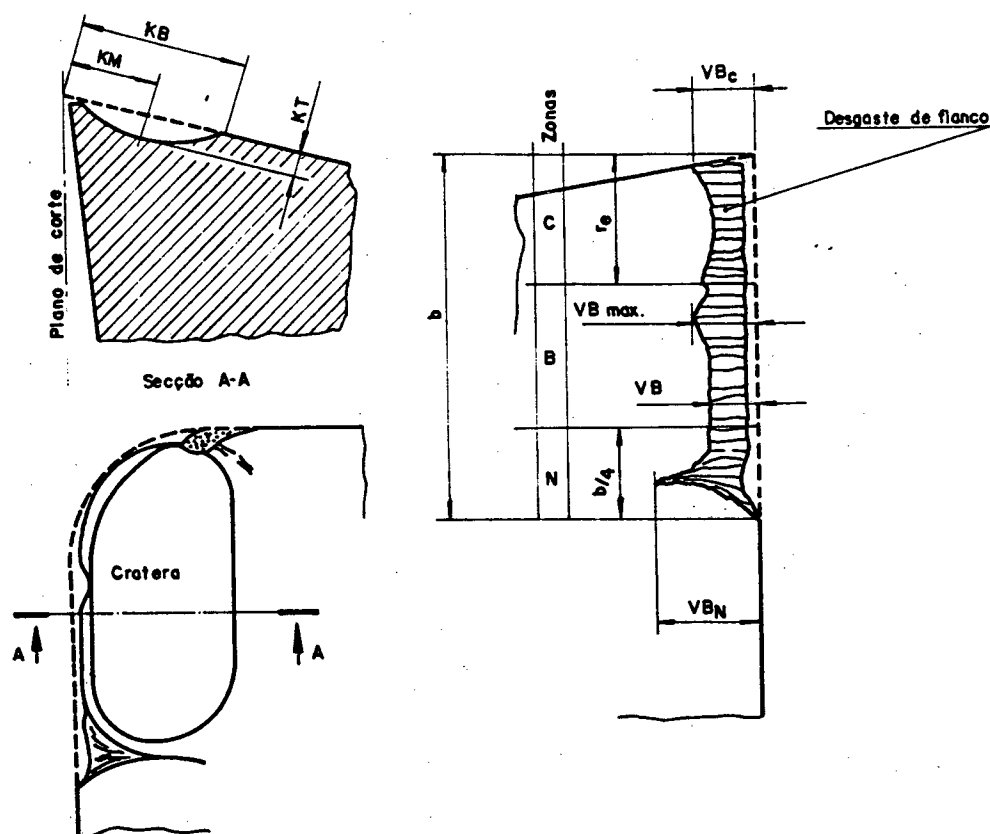


FIGURA 8: Formas de desgaste de uma ferramenta de corte [31].

DESGASTE DE FLANCO: De acordo com a British Standards Institution (BSI), no desgaste de flanco distinguem-se três zonas (figura 08). A zona "C" representa a parte curva do raio da quina da ferramenta de corte. A zona "N" é definida como sendo a quarta parte do comprimento de desgaste " b ", medido do lado oposto do raio da quina da ferramenta de corte. A zona "B" é a zona compreendida entre as zonas "C" e "N". O desgaste médio de flanco VB e o desgaste VB_{max} deverão ser medidos dentro da zona "B". Quando o desgaste é uniforme não ocorre VB_{max} . Usualmente ocorre ainda uma marca de desgaste mais profunda VB_N (notch wear) na

região "N", próxima ao ponto de contato entre o gume e a superfície externa da peça [31].

As componentes da força de usinagem e as vibrações aumentam com o desgaste de flanco. A temperatura na zona de corte também aumenta com o grau de desgaste, o que aumenta a probabilidade de deformação plástica do gume. Um grande desgaste de flanco prejudica o acabamento superficial da peça usinada [32], em consequência de que pode ocorrer um lascamento do gume.

Não é possível descrever o desgaste de flanco por uma equação generalizada para todos os materiais de ferramenta e todos os materiais de peça. Ehmer [33] verificou que o desgaste no flanco da ferramenta de corte de metal duro apresenta três fases durante a vida da ferramenta de corte. Na primeira fase, a ferramenta apresenta um aumento acentuado da marca de desgaste de flanco com um gradiente decrescente, isto é, o gradiente do aumento decresce com o decorrer do tempo.

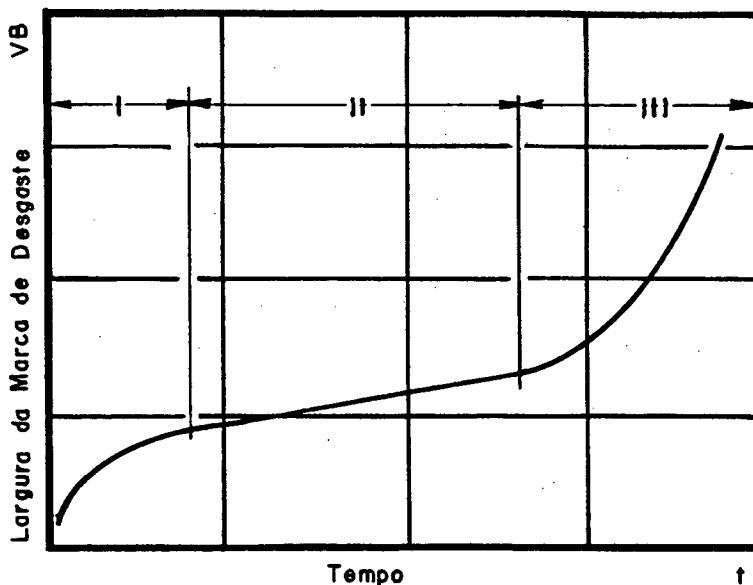


FIGURA 9: Comportamento esquemático da largura da marca de desgaste em dependência do tempo de corte [33].

Numa segunda fase o desgaste da ferramenta estabiliza e tem-se um aumento do desgaste aproximadamente linear. Numa terceira fase, tem-se um aumento progressivo do desgaste de flanco, figura 9.

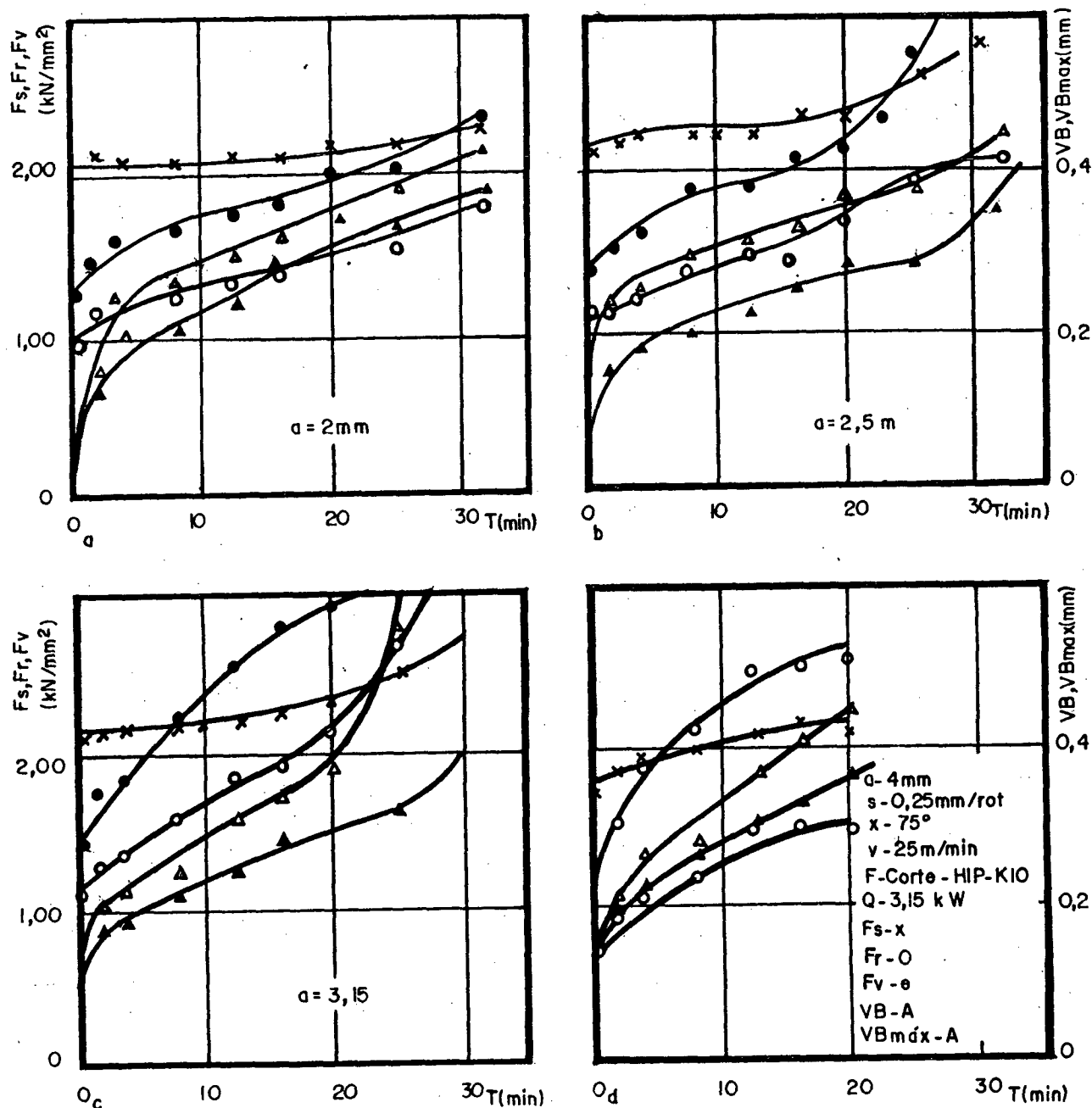


FIGURA 10: Influência da profundidade de corte sobre o comportamento das forças de usinagem e do desgaste médio e máximo dos flancos na usinagem a quente com 3,15 kW de aquecimento [34].

O aumento da força de avanço (F_f) está intimamente relacionado com o desgaste no flanco (superfície de incidência) e, portanto, com a largura da marca de desgaste [30].

Weingaertner [34] também verificou que na usinagem a quente existe uma correlação direta entre a variação da marca de desgaste de flanco e componentes da força de usinagem. Principalmente, a força de avanço e a força passiva apresentam um comportamento linear idêntico ao da marca de desgaste de flanco, figura 10.

Uma afirmação quantitativa sobre o aumento da força de usinagem com o aumento da marca de desgaste de flanco na ferramenta, no entanto, só é possível de uma forma aproximada. Pode-se dizer, que o aumento da força de usinagem para uma marca de desgaste de 0,5 mm seja aproximadamente linear: Para a força de avanço tem-se um aumento de 90 %, a força passiva de 100 % e a força de corte de 20 % [35].

Como consequência do aumento das componentes da força de usinagem o desgaste de flanco pode causar vibrações intensas ("chatter") da peça ou da ferramenta ou ruídos fortes por vibrações da máquina que impedirão o prosseguimento da usinagem.

DESGASTE DE CRATERA: é a concavidade que se forma na face da ferramenta, devido à temperatura elevada, fenômenos de difusão e ao atrito da mesma com o cavaco. A cratera é caracterizada pela sua profundidade (KT), e pela distância do meio ao gume (KM) [35]. Quando a cratera se tornar muito profunda, haverá o enfraquecimento da quina e do gume, podendo provocar a quebra da ferramenta [32].

Com a ocorrência do desgaste de cratera tem-se uma variação

efetiva da geometria da ferramenta. Principalmente o ângulo de saída é influenciado pela formação de cratera.

A variação do ângulo de saída γ em consequência do desgaste de cratera é mais acentuado para ferramentas com ângulo de saída negativo. Kronenberg [36] verificou que a força de corte pode apresentar uma variação de até 50 % para uma variação do ângulo de saída - 15° a $+ 30^\circ$. O mecanismo de desgaste de cratera leva a uma variação do ângulo de cunha da ferramenta de corte e diretamente influencia a estabilidade do mesmo. Consequentemente, ferramentas positivas podem quebrar como decorrência do enfraquecimento demasiado da cunha. As vantagens do ângulo de saída positivo estão na diminuição das forças de corte e de avanço, e na melhora do acabamento superficial. Ângulos de saída negativos aumentam a estabilidade da cunha, contudo, tem-se um maior desgaste de cratera, que por sua vez pode levar a vidas mais curtas das ferramentas, decorrente de força e temperatura mais elevada [30].

Para poder determinar unicamente o comportamento das forças de usinagem dependentes do desgaste de cratera, Meyer [37] reafiou o flanco das ferramentas desgastadas eliminando o desgaste de flanco, repetindo os ensaios nas mesmas condições de usinagem. Desta forma, realizou ensaios com ferramentas que apresentavam diversas profundidades de cratera, com uma variação aproximadamente constante na diferença de profundidade de cratera entre si. Estes resultados estão mostrados na figura 11 para duas geometrias de ferramentas diferentes. Os valores iniciais médios das forças correspondem ao valor médio de todos os gumes no estado de ferramenta afiada.

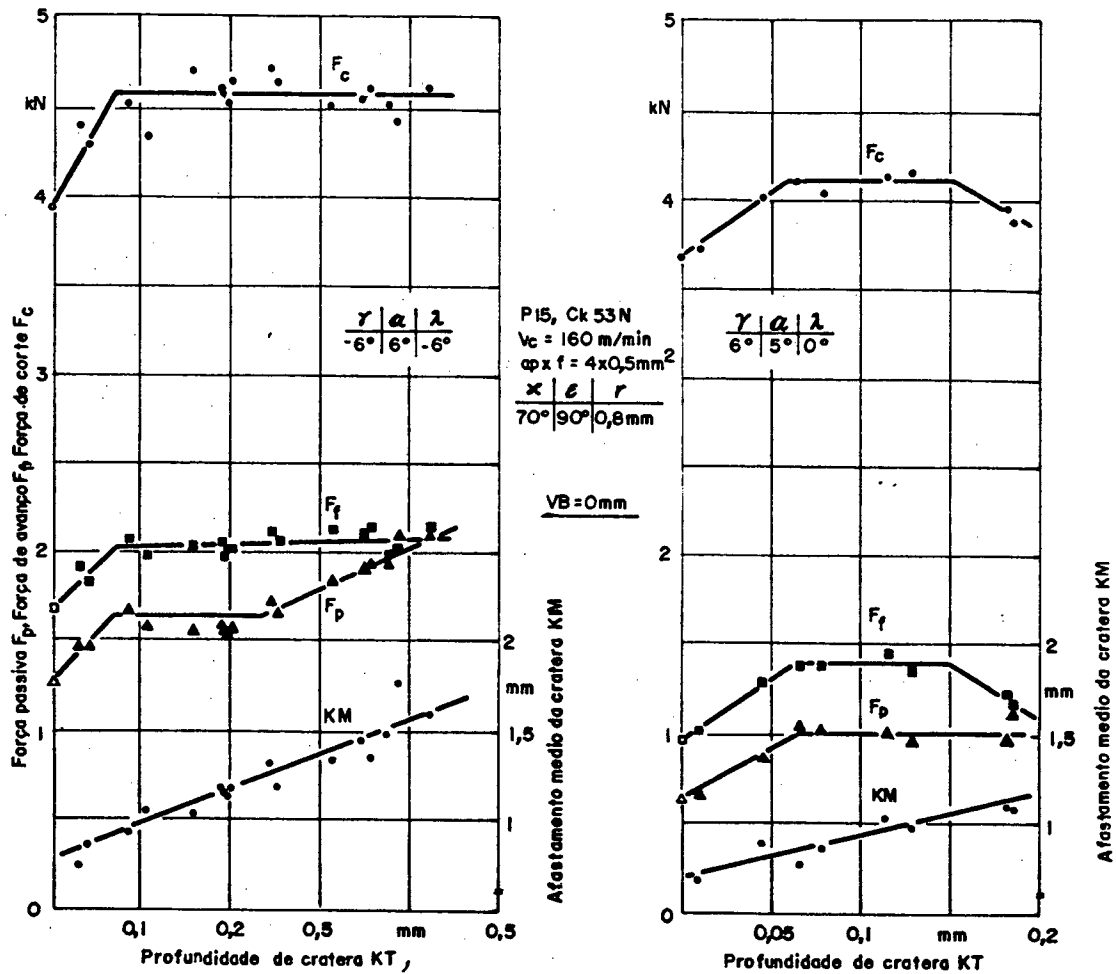


FIGURA 11: Influência do desgaste de cratera sobre as componentes da força de usinagem para uma ferramenta com flanco reafiado [37].

Para ambas as geometrias de ferramentas tem-se um aumento das componentes da força de usinagem até uma profundidade de cratera de aproximadamente 0,06 mm. Se houver um aumento posterior do desgaste de cratera, não se terá mais uma modificação da força de avanço e da força de corte para ferramentas negativas. Só para ferramentas positivas elas novamente diminuem com o aumento da profundidade de cratera.

A força passiva apresenta um leve aumento para um aumento da marca de desgaste e ângulo de saída negativo e uma diminuição da

força para um ângulo de saída positivo. O aumento é decorrente de uma marca de desgaste acentuada na região da quina da ferramenta, que não pode ser reafiado. Para ângulos de saída positivos, este aumento compensa a diminuição da força. É de se supor, que sem o desgaste da quina a força passiva devesse apresentar um comportamento semelhante ao de outras ferramentas.

Como os resultados de ensaios demonstram, a compensação das ações pela marca de desgaste de cratera ocorre dentro de uma faixa da profundidade de cratera, que por sua vez depende do ângulo de saída.

Se para marcas de desgaste mais acentuadas tem-se uma diminuição das forças, então estas podem ser explicadas pela influência do desgaste de cratera para ferramentas com ângulos de saída positivo. Para ângulos de saída negativos outras influências como, por exemplo, a do material da peça podem explicar este comportamento.

O desgaste de cratera tem uma influência imediata sobre a geometria da face da ferramenta e influencia o mecanismo de formação de cavaco.

A variação do ângulo de saída de valores negativos para positivos tem uma influência sobre o fator de recalque do material que está sendo usinado. Ângulos de saída positivos levam a uma menor deformação do material e com isto a uma quebra mais difícil do cavaco. Este conseqüentemente pode limitar o uso de uma ferramenta de corte.

A figura 12 mostra vários tipos de cavacos e suas respectivas designações.

As quatro formas superiores apresentam um transporte de cavaco difícil. Cavacos helicoidais planos preferencialmente

apresentam a sua saída tangenciando o flanco da ferramenta e, em decorrência disso, danificam o suporte e quina da ferramenta. Cavacos em fitas, cavacos emaranhados e cavacos fragmentados apresentam um perigo para o operador da máquina ferramenta.

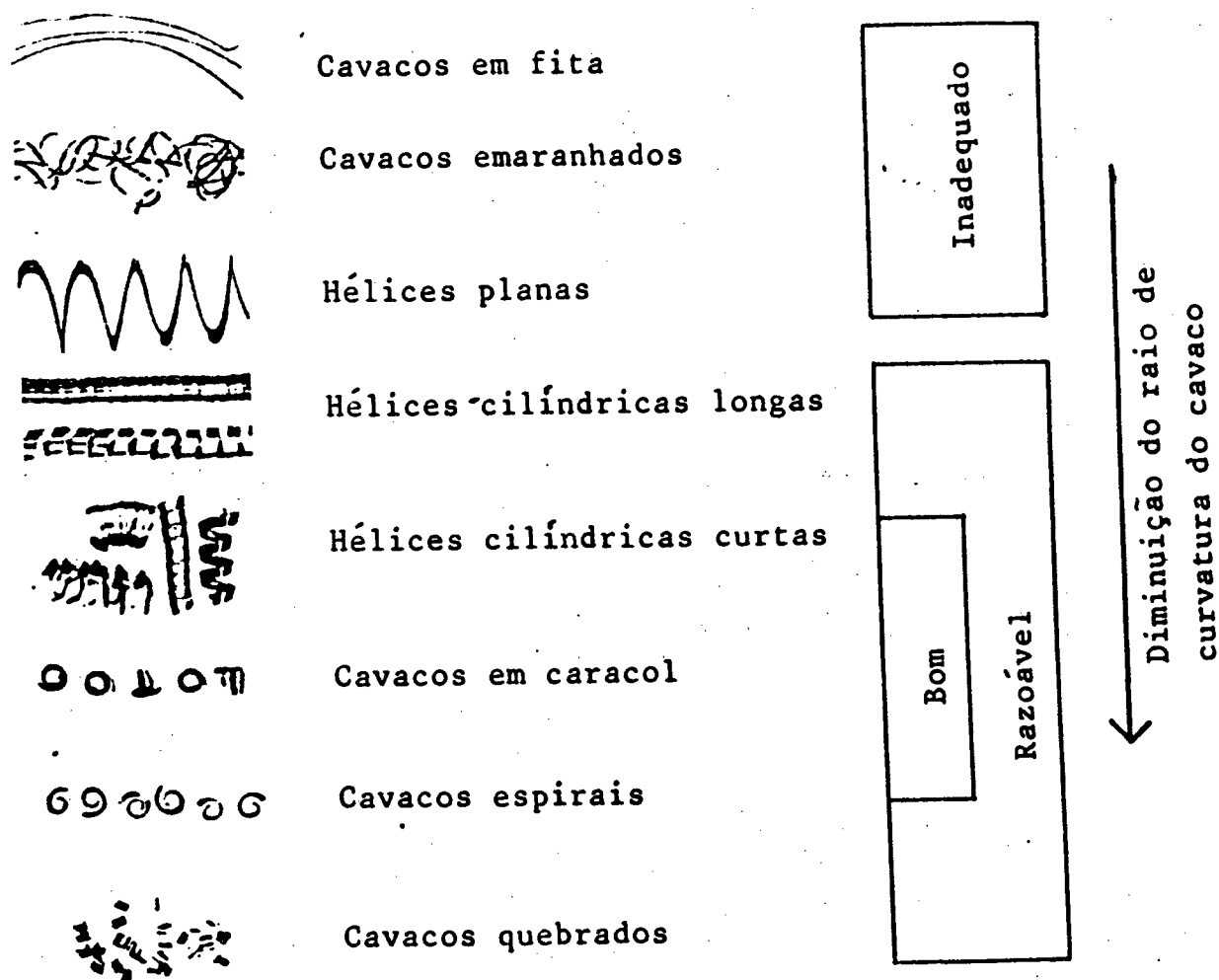


FIGURA 12: Formas de cavaco [38].

4.1.2 Mecanismos de Desgaste

O desgaste da ferramenta é consequência das solicitações térmicas e mecânicas elevadas. Segundo a literatura, distinguem-se vários mecanismos de desgaste da ferramenta conforme mostrado na figura 13:

Os diversos mecanismos de desgaste agem simultaneamente, de forma que tanto sua causa como seu efeito dificilmente podem ser distinguidos entre si.

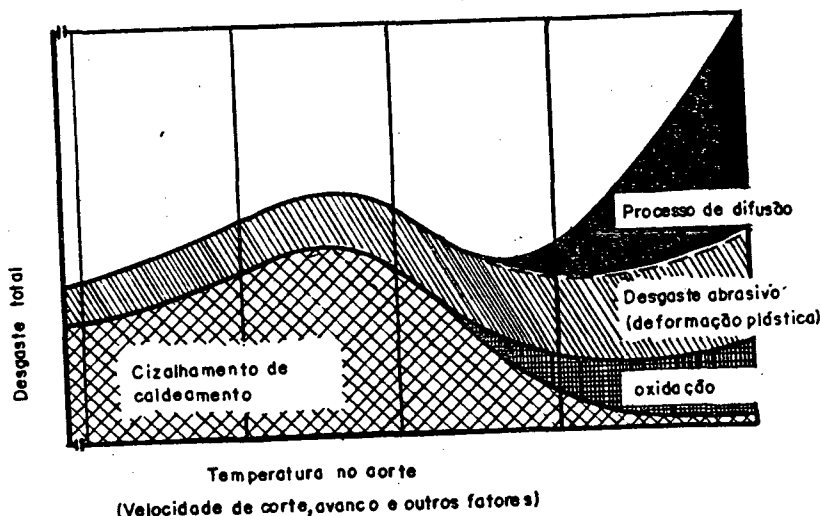


FIGURA 13: Influência dos mecanismos de desgaste no desgaste total da ferramenta [29].

a) **ADERÊNCIA:** este fenômeno ocorre entre a peça e as asperezas superficiais da ferramenta, e se deve a ação das altas temperaturas e pressões presentes na zona de corte e ao fato de que a superfície inferior do cavaco, recém arrancado, apresenta-se limpa, sem camadas protetoras de óxidos e, portanto, quimicamente muito ativa [35].

A prova mais conhecida do mecanismo de aderência é a formação do gume postiço, onde parte do cavaco caldeia na ferramenta devido às pressões, temperatura e tempo de contato.

O desgaste aumenta inicialmente com a velocidade, pois vão se alcançando temperaturas que favorecem a aderência. Já em velocidades mais elevadas, a temperatura sobe a ponto de amolecer as partículas aderidas, enquanto o material da ferramenta, muito mais resistente ao calor, não é afetado (figura 14). O

arrancamento das partículas aderidas se torna mais fácil, o desgaste da ferramenta diminui, bem como o recalque do cavaco, pois o mesmo desliza mais facilmente pela face da ferramenta.

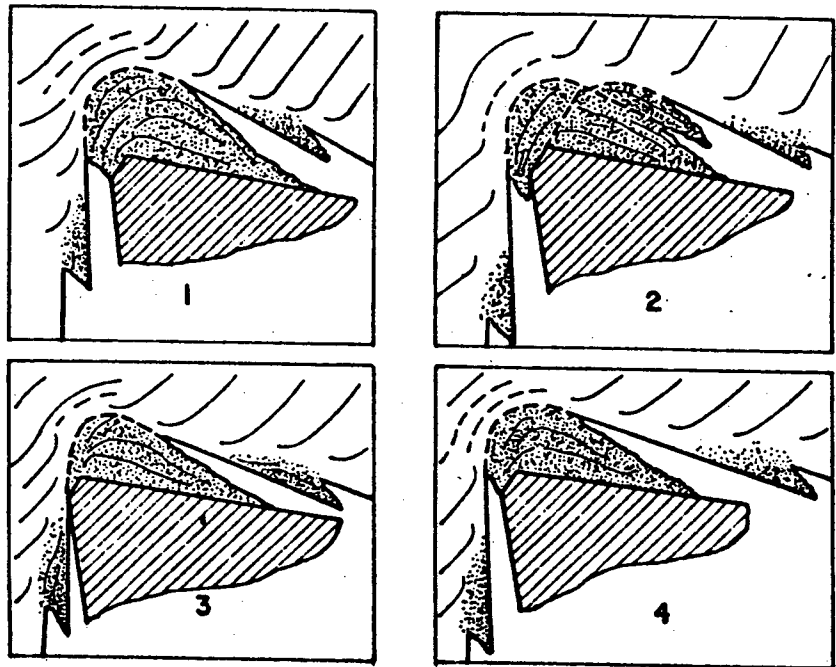


FIGURA 14: Esquema da formação do gume postiço [76].

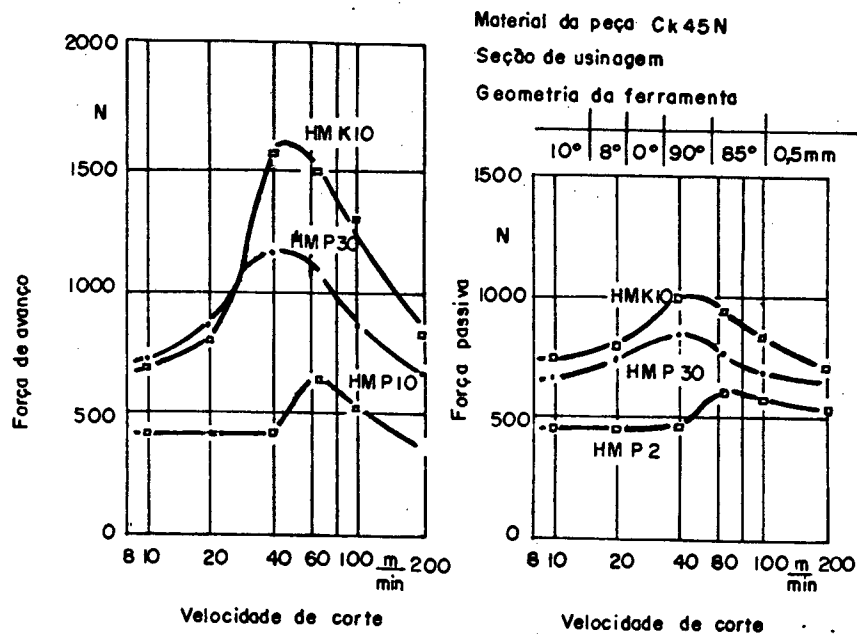


FIGURA 15: Força de avanço e força passiva como função da velocidade de corte no torneamento com diversos tipos de metal duro [30].

A figura 15 mostra a dependência da força de avanço e da força passiva com a velocidade de corte para o emprego de diversos tipos de metal duro. As causas para os valores máximos das curvas são explicados pela formação do gume postiço [30].

b) **DIFUSÃO:** ocorre em temperaturas mais elevadas na interface cavaco-ferramenta, nas quais os átomos adquirem uma maior mobilidade. Para ferramentas de aço carbono e aço rápido, esta forma de desgaste tem importância secundária, pois a faixa de temperatura de difusão é bem mais alta que a temperatura de amolecimento da ferramenta. No metal duro, entretanto, o fenômeno da difusão tem presença marcante na faixa de temperaturas de 700 a 1300 °C [35].

c) **OXIDAÇÃO:** Ocorre nos contornos da região de contato entre ferramenta e peça. Pode ser detectado pelo aparecimento de cores de revenimento. A oxidação depende da liga do material da ferramenta e da temperatura de aquecimento.

Para materiais de aço ferramenta e aço rápido, a oxidação praticamente não tem importância, uma vez que sua resistência a quente é ultrapassada antes que a superfície apresente uma oxidação mais acentuada. Já nas ferramentas de metal duro a base de tungstênio, em decorrência da temperatura elevada e ação do oxigênio do ar, se forma um filme de óxido. A ação destrutiva da oxidação sobre a estrutura do metal duro, pode ser observada, de modo dominante, no gume secundário. Onde se forma um óxido complexo de tungstênio, cobalto e ferro, que em decorrência do seu maior e volume em relação ao volume do carboneto de tungstênio, formando verdadeiras "rugos" na superfície da

ferramenta levando ao lascamento e quebra da quina da ferramenta [30].

d) **ABRASÃO:** é o arrancamento de finas partículas de material, em decorrência do escorregamento sob alta pressão e temperatura entre a peça e a ferramenta. Este mecanismo de desgaste aumenta com o número de inclusões e partículas duras no aço 7 (como, por exemplo, carbonetos e óxidos). O aumento da velocidade de corte resulta num aumento considerável da velocidade de desgaste, em virtude do efeito de impacto e da redução da resistência da ferramenta à abrasão, decorrente da maior temperatura de trabalho [35].

e) **DEFORMAÇÃO PLÁSTICA:** o gume é deformado plasticamente se a ferramenta dispõe de uma resistência à deformação muito pequena, mas tem uma tenacidade suficiente. É o caso de ferramentas não totalmente temperadas, ou quando ela amolece devido a altas temperaturas de trabalho (figura 16) [30].

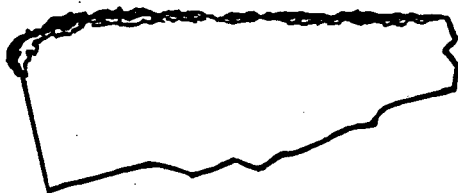


FIGURA 16: Deformação Plástica [30].

Como consequência dessas solicitações térmicas e mecânicas excessivas tem-se danificações no gume como lascamento e/ou a quebra da ferramenta.

As forças de corte excessivas, muitas vezes, levam a micro e macrolascamentos do gume ou da quina, principalmente quando o ângulo de cunha ou o ângulo de quina da ferramenta é muito pequeno ou o material da ferramenta é demasiadamente frágil. Nesses lascamentos, a linha de fissura é definida pela direção da força de corte. Interrupções de corte também provocam lascamentos, principalmente, na usinagem de materiais tenazes que apresentam cavacos que facilmente caldeiam ou soldam na face da ferramenta [30].

A presença de inclusões duras no material da peça provoca lascamentos parciais, especialmente nos graus mais duros e resistentes ao desgaste térmico de metal duro e nas cerâmicas. Os aços rápidos são pouco sensíveis a este tipo de sobressolicitação. Também um mau acabamento do gume, dimensões excessivas do cavaco e vibrações podem resultar em lascamento [30].

Em uma análise mostrada na figura 17, Kluft [1] apresentou para a usinagem com metal duro no torneamento uma subdivisão das fraturas das ferramentas.

Para os lascamentos (tipo A até D) apenas pequenas parcelas do gume quebram parcialmente ou totalmente em combinação com uma fina camada do flanco ou da face da ferramenta. Nisto a maior parte ativa do flanco ou da face permanece intacta. Sobre a superfície de quebra o gume se desloca até a linha de quebra. Em contrapartida, as fraturas (tipo E até G) podem ser reconhecidas pelo fato de que tem-se uma grande parcela, relativamente espessa, fraturada até a parte inferior da pastilha e que nestes casos uma parte do gume principal ou secundário não existem mais. Uma quebra total (tipo H) se caracteriza pelo fato que a seção da

fratura é maior que a seção de usinagem $b \times h$.

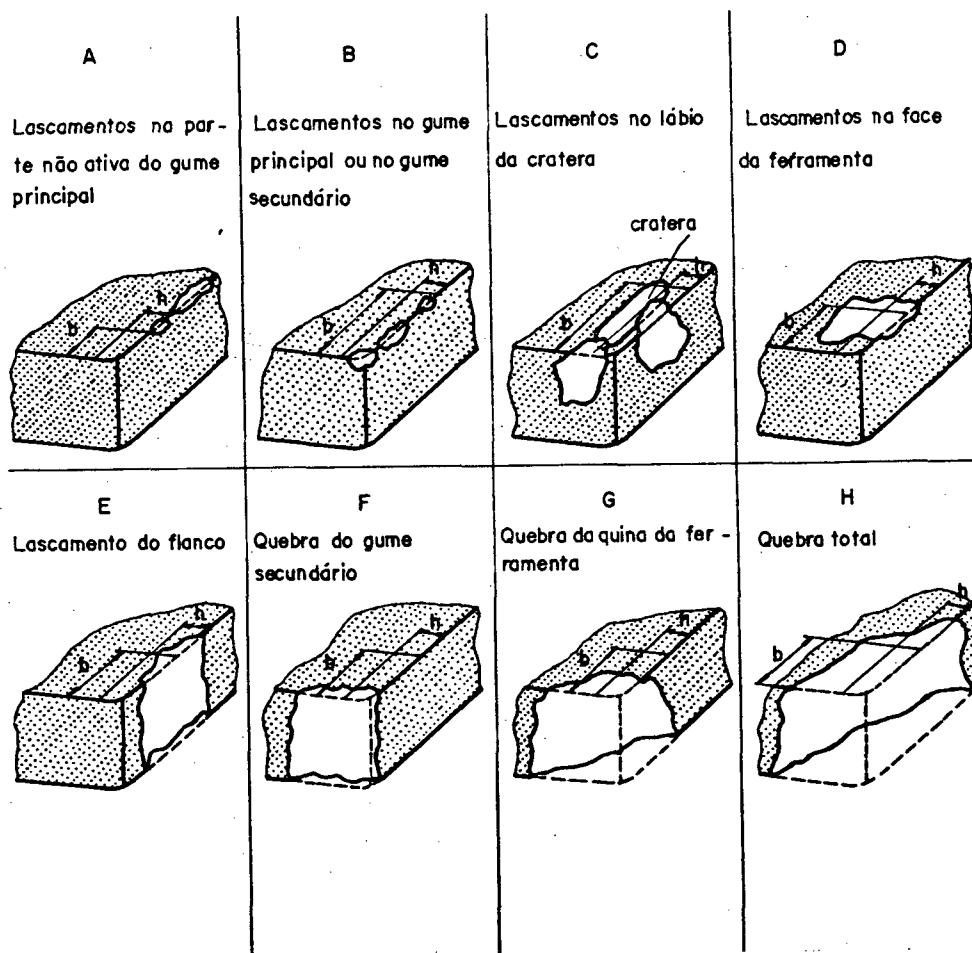


Figura 17: Subdivisão das fraturas das ferramentas [1].

A quebra do tipo A ocorre exclusivamente para cavacos (por exemplo, cavacos espirais ou cilíndricos), que atingem o flanco da ferramenta fora dos limites da seção de usinagem logo abaixo do gume. Se a sua direção de impacto apresenta uma componente no sentido do gume podem surgir impulsos de tensões sobre o flanco. Estes podem ultrapassar o limite de resistência ou a resistência a fadiga do material da ferramenta e levar a uma quebra do gume.

Em ensaios próprios, o comportamento de cavacos pode ser observado múltiplas vezes. Frequentemente ele leva a quebras do

tipo A, como também é mostrado pelos resultados de aproximadamente 25 % do total das pastilhas analisadas. Se não tem-se alterações na profundidade de corte ou não aumenta-se a mesma, esta forma de fratura tem uma importância subordinada.

Lascamento do tipo B até D ocorrem quando tem-se uma solicitação dinâmica ou térmica excessiva do gume. As duas últimas formas de solicitação normalmente são consequência de interrupções de corte de zona nas peças com durezas variáveis, bem como decorrente de vibrações na máquina ferramenta ou das ferramentas de corte.

Quebras do gume do tipo B frequentemente ocorrem para avanços pequenos. Elas ocorrem em corte interrompido durante a saída do corte, normal em relação a superfície da peça. Para tais tipos de saída de corte podem ocorrer tensões excessivamente elevadas sobre a face da ferramenta, que apresenta um máximo para apenas $1/3$ da espessura de usinagem. Para este valor do afastamento também pode ser observado o maior número de fraturas deste tipo.

Quebras do lábio de cratera (tipo C) são condicionados pelo desgaste. A sua causa está fundamentada pelo enfraquecimento geométrico do gume, em decorrência da cratera. No gume secundário uma fratura deste tipo muitas vezes só é reconhecida com dificuldade, uma vez que ele é muito semelhante à provocada pelo desgaste por oxidação.

Uma fratura na face da ferramenta ou de uma parcela da face da ferramenta do tipo D, muitas vezes ocorre apenas para marcas de desgaste excessivas no flanco. Mas também para revestimentos defeituosos este tipo de fratura é possível.

Através de fraturas do tipo B até D tem-se muitas vezes uma

modificação da superfície de corte. Além disso, a formação de cavaco pode ser influenciada por fraturas desse tipo. A qualidade da superfície da peça pode piorar consideravelmente e o diâmetro da peça pode aumentar. Esse tipo de fratura, em decorrência da ação do aumento de tensões em cantos vivos, pode ser a causa para outros tipos de fratura ou até para fratura total.

Fraturas do tipo E, F e G, bem como fratura total do tipo H, ligeiramente ocorrem para grandes espessuras de usinagem H. Mas também as concentrações de tensão no material da ferramenta, que podem ser decorrentes de pequenos erros de planicidade sobre a superfície de apoio como, por exemplo, a pastilha de apoio ou o sistema de fixação, levam a um aumento de perigo dessa fratura.

Todas as formas de fratura citadas podem ocorrer por falhas no material da ferramenta. Ferramentas podem quebrar no início do corte ou logo depois do início do corte. Em decorrência da melhoria da qualidade, esta causa de fratura hoje tem apenas uma importância secundária.

A figura 18 mostra a faixa de dispersão das variações das componentes da força de usinagem relativas a 10 quebras totais e a 10 lascamentos em ferramentas de metal duro.

Na quebra total a força de usinagem em comparação com as duas componentes de cisalhamento apresenta valores de aumento consideravelmente menores, no entanto, para lascamentos ela praticamente não apresenta variações. Dependendo do tipo de lascamento, bem como da posição e forma do limite de lascamento, pode-se verificar uma das componentes de cisalhamento com um valor elevado e a outra com valor de um pequeno aumento da força.

Com a quebra da ferramenta, as componentes da força de usinagem aumentam a um valor múltiplo de seu valor original. Para

a força de avanço e força passiva tem-se um aumento de aproximadamente 15 vezes os seus valores iniciais [9].

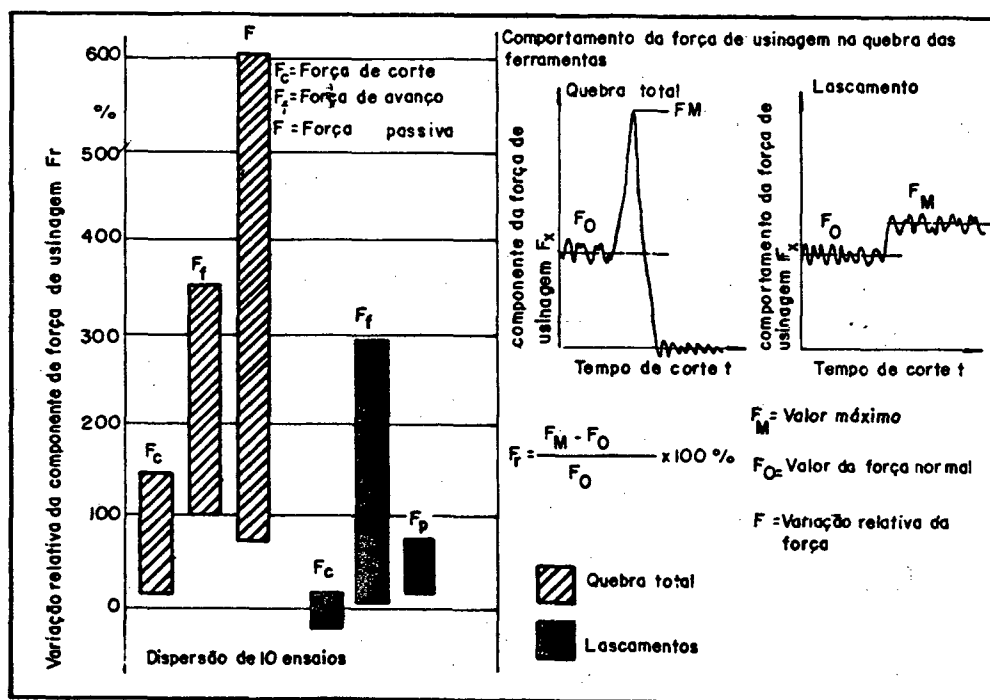


FIGURA 18: Dispersão relativa da componente da força de usinagem para quebras de ferramentas de metal duro [01].

No emprego de cerâmica de corte, no momento da quebra total, em média, tem-se um aumento relativo da força de 20 % em relação aos valores obtidos para o metal duro. Este comportamento pode ser explicado pelo fato que em decorrência de sua fragilidade tem-se partículas menores do que no caso do metal duro. Estas partículas pequenas não levam a um deslocamento tão acentuado do suporte da ferramenta, como é o caso de partículas grandes de metal duro.

Outras perturbações de importância secundária, por produzirem variações de influência indireta na força de usinagem, temperatura ou vibrações, são as fissuras transversais e longitudinais e trincas, que tem origem térmica ou dinâmica, bem

como as correntes elétricas.

As FISSURAS TRANSVERSAIS aparecem devido a solicitação alternante compressiva que leva a fadiga da cunha de corte.

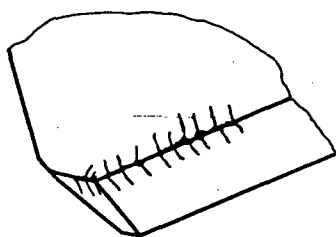


FIGURA 19: Fissuras transversais [30].

As rápidas variações das forças de usinagem em cortes interrompidos, de sobremodo no fresamento com ferramentas de metal duro e a solicitação alternante, provocada pela formação de cavacos anelares (como na usinagem do titânio) levam à fadiga da ferramenta, e à possível formação de fissuras transversais (figura 19) [30].

As FISSURAS LONGITUDINAIS são danificações no gume, como decorrência de solicitações térmicas alternantes apresentam-se na forma de fissuras longitudinais em forma de pente.

Possuem importância no corte interrompido, como no fresamento, onde a interrupção sucessiva leva a um aquecimento elevado e posteriormente um resfriamento no ar; esta alternância de temperatura pode provocar tensões de escoamento, de forma a termos deformações plásticas na ferramenta e fissuras no percurso das isoterma do campo de temperatura na cunha (fissuras

longitudinais) [30].

Também a variação da profundidade de corte e a alimentação irregular de fluidos de corte podem levar à fadiga térmica da cunha e conseqüentemente a uma fissura longitudinal (figura 20) [32].

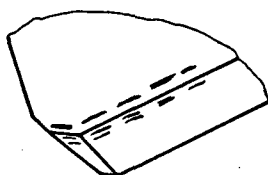


FIGURA 20: Fissuras longitudinais [32].

No entanto, tanto as fissuras transversais como as fissuras longitudinais dificilmente são observadas nas pastilhas modernas, que em decorrência do refino de grão no processo de fabricação, apresentam uma melhor tenacidade.

TRINCAS DEVIDO AS VARIAÇÕES DE TEMPERATURA: ocorrem principalmente em pastilhas de carboneto pouco tenazes; sendo sua formação governada por dois fatores :

- variações bruscas de temperatura;
- brasagem da pastilha no cabo da ferramenta.

Durante a usinagem desenvolve-se grande quantidade de calor, que é dissipado em parte pela ferramenta. A região da ferramenta, na qual a temperatura é mais alta, é a que está em contato com o cavaco. Nas zonas mais distantes desta a temperatura é bastante inferior, de acordo com o gradiente de temperatura na ferramenta.

Em consequência disto, a ferramenta se dilata e se deforma desigualmente. As pastilhas brasadas deformam-se diferentemente dos suportes, estando sujeitas a tensões de cisalhamento na superfície de contato pastilha-suporte. Estas tensões provocam tensões de flexão na pastilha, as quais podem originar tensões de tração na face. Tais tensões poderão conduzir a formação de trincas, as quais em geral se localizam no meio da pastilha e se desenvolvem perpendicularmente ao gume. Na brasagem da pastilha ao cabo se processa fenômeno idêntico [76].

As CORRENTES ELÉTRICAS se produzem no contato entre a peça e a ferramenta durante a usinagem. Estas correntes são devido ao fenômeno termo-elétrico, gerando-se do aquecimento do ponto de união de um par de materiais distintos (termopar). A corrente gerada tem duas naturezas distintas: uma devido a termoeletricidade, de caráter puramente eletrônico; outra eletroquímica, devido a reações entre as superfícies da peça e da ferramenta, provocando uma corrente iônica e um deslocamento de massas, que se traduz por um desgaste eletroquímico [35].

Com o aumento da condutividade térmica do material da ferramenta, em regra geral, pode-se também verificar um aumento das componentes da força de usinagem [30,35].

4.1.3 Material da Ferramenta

Tem influência preponderante na velocidade de corte admissível. Os materiais para ferramenta devem satisfazer da melhor forma possível as seguintes propriedades :

- elevada resistência a compressão;

- elevada dureza;
- elevada resistência a flexão e tenacidade;
- elevada resistência interna de ligação;
- elevada resistência a quente;
- elevada resistência a oxidação;
- elevada resistência a abrasão;
- pequena tendência para difusão e caldeamento.

4.1.3.1 Influência do Material da Ferramenta sobre a Força de Usinagem

A vida da ferramenta é normalmente mais longa quando realiza uma operação de corte contínuo, como no torneamento de um cilindro plano do que numa operação de corte interrompido. O impacto da ferramenta, especialmente no caso do emprego de pastilhas de material frágil, causa uma falha mais rápida. A situação é, em geral, mais severa se os ângulos da ferramenta e as condições de início de corte determinam um impacto no gume afiado ou na quina da ferramenta [35].

Através da equação de regressão [1] para análise da influência do tipo de revestimento da ferramenta sobre o comportamento das forças de usinagem constatou-se que não existe um comportamento linear entre a progressão de desgaste e o aumento das forças.

Na figura 21 está mostrado o comportamento típico das curvas de força para os diversos materiais e da grandeza de desgaste dominante VB ou KT.

Em ferramentas de metal duro, a formação de crateras na face pode determinar o fim da vida, ou porque a profundidade KT da

cratera ameaça o lascamento da pastilha ou porque a faixa KT se reduz a ponto de ameaçar a integridade do gume.

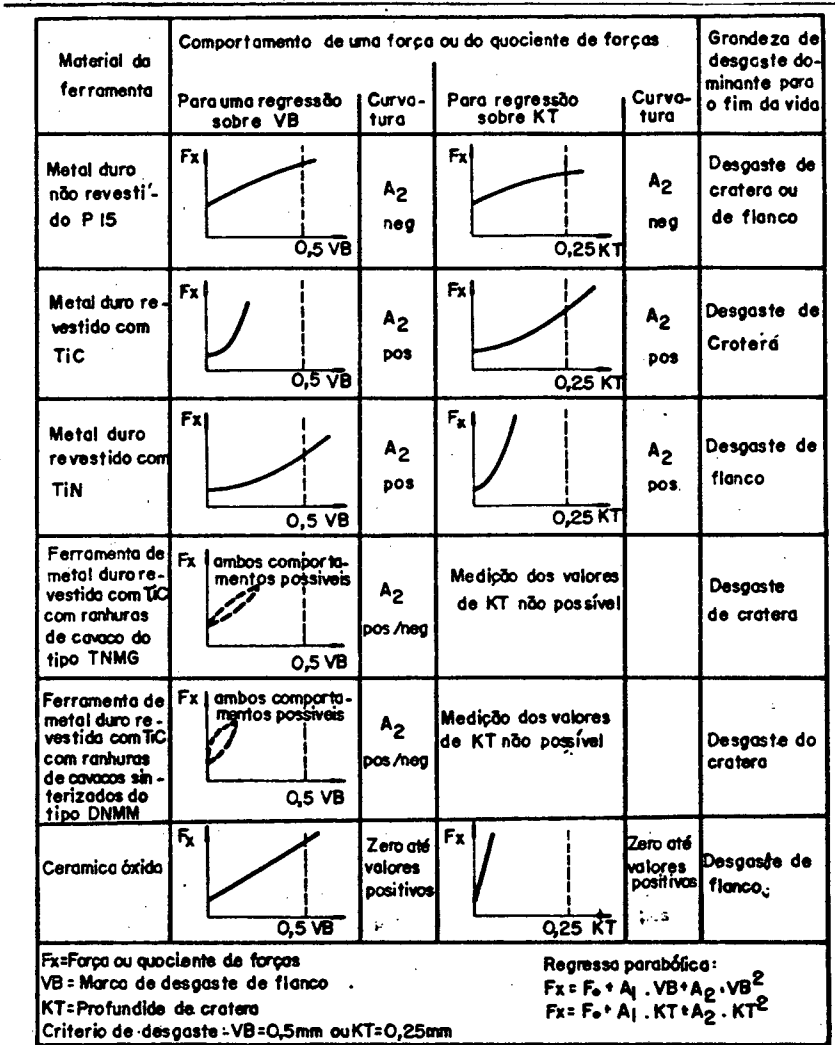


FIGURA 21: Comportamento típico das curvas de força ao longo da vida para os diversos materiais de ferramenta [01].

4.1.4 Influência da Temperatura na Vida da Ferramenta

Verifica-se experimentalmente que os trabalhos de deformação da raiz do cavaco durante a usinagem, de atrito entre o cavaco e a ferramenta e de atrito entre a peça e a ferramenta são transformados em calor. Consequentemente a temperatura da

ferramenta de corte se elevará de acordo com o calor específico e a condutibilidade dos corpos em contato, além das dimensões das seções onde se escoar o calor [39].

Os efeitos de formação e transmissão do calor no corte de metais são muito complexos, pois com o aumento da temperatura mudam as características físicas e mecânicas do metal em trabalho [5]. Para as condições de corte sob as quais trabalham as ferramentas de metal duro, ter-se-á tempos de aquecimento e de deformação do material da peça, na ordem de grandeza de alguns milisegundos; a velocidade de aquecimento, teoricamente está localizada na faixa de 10^6 °C/s [30]. A temperatura, influenciando no desgaste das ferramentas, limita a aplicação de regimes de corte mais altos, fixando, portanto, as condições máximas de produtividade e vida das ferramentas [39].

A posição dos valores máximos e mínimos da curva VB x V_c na região de formação do gume postigo (figura 22) é dependente da temperatura.

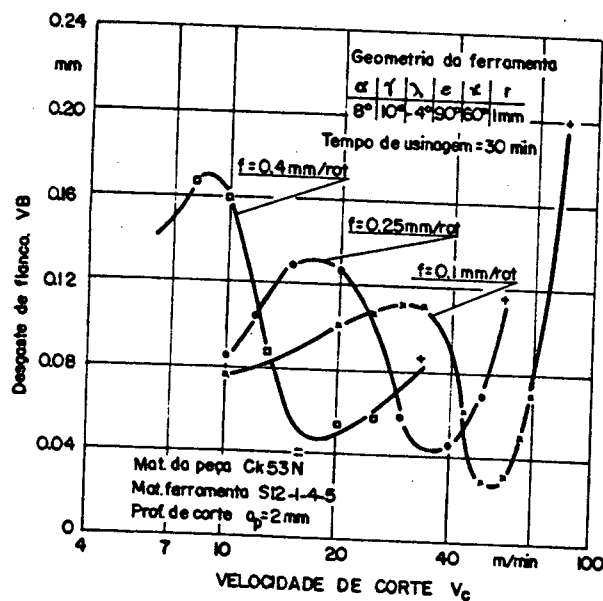


FIGURA 22: Influência da velocidade de corte e do avanço no desgaste da ferramenta [30].

Provocando-se um aumento da temperatura de corte (por exemplo, pelo aumento do avanço, da velocidade de corte, pelo aumento negativo do ângulo de saída, pelo aumento da resistência do material), desloca-se os valores máximo e mínimo para velocidades menores. Medidas que diminuem a temperatura de corte (por exemplo, fluido de corte), deslocam os valores extremos para velocidades de corte mais elevadas [30].

O desgaste de flanco aumenta com o aumento da velocidade de corte, no entanto, não como uma função contínua e sim apresenta dois valores extremos característicos. O desgaste inicialmente atinge um máximo na velocidade para a qual a formação do gume postiço tem a sua maior intensidade. Um desgaste mínimo ocorre em uma velocidade para a qual não tem-se mais a formação do gume postiço [30].

Após ultrapassar o máximo, apesar do aumento da velocidade de corte, tem-se uma diminuição da marca de desgaste de flanco, decorrente de processos de recristalização e mudança de fase, que leva a um enfraquecimento sucessivo do gume postiço. O gume se torna instável e não desliza mais entre a superfície de corte e flanco, e sim é deslocado totalmente sobre a face da ferramenta [30].

Variações de temperatura permitem detectar variações no processo de corte.

Inconveniente é que não se pode medir a temperatura na raiz do cavaco. Afastamentos dos sensores da região de geração de calor significam perdas em sensibilidade e velocidade de reação. Desta forma, o monitoramento da temperatura é apenas interessante para um acompanhamento de variações lentas como, por exemplo, a vida da ferramenta em um processo bem comportado.

Quebras, micro e macro lascamentos, bem como a colisão, só são reconhecidas após um tempo muito grande.

4.1.5 Efeitos do Fluido de Corte sobre o Desgaste

Durante a usinagem a ferramenta é submetida a solicitações mecânicas e térmicas bastante elevadas, onde a energia necessária para a formação do cavaco é transformada praticamente em calor nas regiões de cisalhamento e atrito [30].

Como consequência dessa solicitação, tem-se o desgaste abrasivo-mecânico e o cisalhamento de micro-soldagem, que podem aparecer em todas as faixas de velocidades empregadas na usinagem, bem como processos de difusão e oxidação, que apenas ocorrem para certas temperaturas [30].

O fluido de corte pode influenciar, em princípio, apenas o desgaste de adesão, porque altas temperaturas e pressões favorecem a formação do gume postiço. levando a saída sequencial de pequenos gumes postiços dentro de uma certa faixa de velocidade [30].

A lubrificação da face da ferramenta (superfície de saída) por fluidos de corte com aditivos de extrema pressão (EP) ou por óleos graxos, pode evitar a formação do gume postiço [35].

Com o aumento da velocidade de corte - na faixa em que tem-se a formação do gume postiço - as condições para a formação de um filme lubrificante resistente a alta pressão se tornam cada vez mais desfavoráveis, porque o aumento da velocidade de saída do cavaco, leva a uma diminuição do tempo disponível para a reação entre os aditivos e a superfície metálica. Ao mesmo tempo, o aumento da temperatura leva a deformações plásticas da

ferramenta e a processos de difusão entre o par de atrito, de forma que se torna necessária uma refrigeração da área de corte [30].

É possível que por uma refrigeração inadequada o desgaste da ferramenta seja aumentado consideravelmente e a vida em decorrência disso, é reduzida [30].

Comparando-se as curvas velocidade de corte e desgaste da figura 23, obtidas para o corte a seco, com óleo de corte e com uma emulsão, então pode-se reconhecer que a refrigeração atua no sentido de aumentar o desgaste da ferramenta. Pode-se concluir que a emulsão leva a um resfriamento e em decorrência disso, a um aumento da resistência do material usinado. Mas como tem-se apenas um pequeno aumento da ação lubrificante, tem-se um comportamento de desgaste piorado para a emulsão de corte. Já o óleo apresenta menos ação refrigerante, aumentando a velocidade para um desgaste máximo equivalente ao do processo a seco [30].

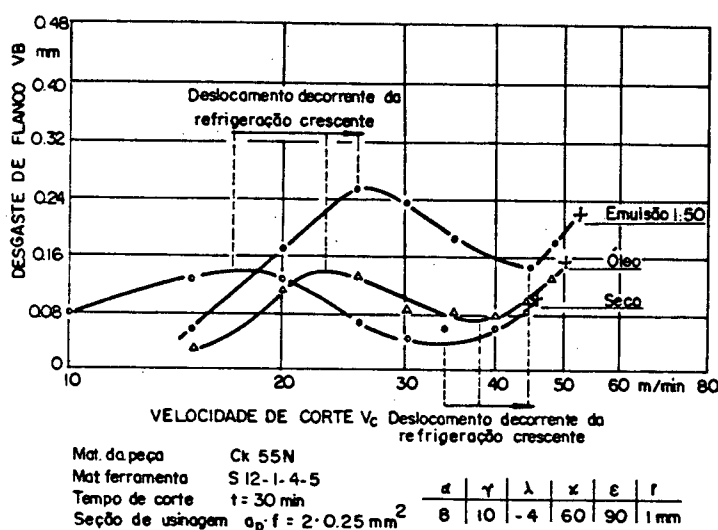


FIGURA 23: Influência do fluido de corte no desgaste [30].

Desses resultados, pode-se concluir que um aumento da vida da ferramenta com a diminuição da temperatura de trabalho, só pode ser atingido se as condições de usinagem são escolhidas de

tal forma que as temperaturas atingidas no gume, estejam situadas na proximidade do ponto de amolecimento da ferramenta. Apesar de o desgaste com refrigeração intensiva, em dependência da velocidade de corte, ser maior que na usinagem a seco, as ferramentas resistem a uma vida maior que sem fluido de corte [30].

4.1.6 Vibrações

Um outro fator de redução da vida da ferramenta, especialmente de metal duro e cerâmica, é a vibração. Esta, mesmo que de pequena intensidade já produz micro lascamentos do gume, reduzindo a durabilidade de ferramentas de materiais frágeis. Ferramentas de aço rápido são menos sensíveis a vibrações [35].

As vibrações podem ser oriundas de fatores externos ao sistema peça-ferramenta, devendo-se a: engrenagens e polias desbalanceadas, erros de engrenamento, folgas nos mancais, rigidez insuficiente, etc [35].

As vibrações do sistema peça-ferramenta podem classificar-se em :

- Vibrações forçadas: são as que decorrem de forças variáveis, atuando ciclicamente e obrigando a ferramenta ou a peça a vibrar com uma frequência igual ao destas forças [35];
- Vibrações auto-excitadas: são as que decorrem de uma instabilidade dinâmica do sistema peça-ferramenta. Esta vibração é característica na usinagem de materiais que apresentam muitos pontos duros ou que apresentam um encruamento acentuado durante a deformação da raiz do cavaco [35].

Vibrações regenerativas resultam da desigualdade do início do

corte na superfície devido a variações na força de corte na última ocasião na qual a ferramenta passou sobre aquela parte específica da superfície [40,41].

A medição do desgaste e do reconhecimento da quebra da ferramenta por vibrações, que ocorrem em baixa frequência (na faixa de 1-15 kHz) e emissão acústica (EA) em alta frequência (na faixa de 0.1-1 MHz) [15,42-43] também é possível.

Durante a usinagem, a peça e os cavacos atitam contra a ferramenta desgastada e produzem vibrações que podem ser monitoradas e as informações usadas de várias maneiras para o monitoramento da falha da ferramenta [15,42-44].

O processo de desgaste da ferramenta foi dividido em 5 estágios: (I) desgaste inicial, (II) desgaste normal, (III) desgaste com micro-lascamentos, (IV) desgaste rápido, e (V) quebra da ferramenta. No estágio de micro-lascamentos, foi observado que existiam pequenas mudanças na forma geométrica da ferramenta tanto quanto os valores médios da força e temperatura de usinagem. Ao mesmo tempo, o sinal de vibração variou fortemente (10 vezes mais do que o estágio normal de desgaste), particularmente na frequência de 0-20 kHz [45].

Também observou-se que as vibrações verticais da ferramenta no curso de usinagem estável apresentou-se sempre senoidal, com a frequência igual a sua frequência natural [42]. A potência do sinal de aceleração obtido pela análise espectral foi uma função linear da velocidade de corte e do desgaste da ferramenta, e variou num nível de 1:10 entre uma ferramenta nova e uma ferramenta desgastada. Um modelo matemático foi proposto e mostrou boa conformidade com seus resultados experimentais.

Por outro lado, a emissão acústica (AE) pode ser definida

como sendo a energia transitória espontaneamente emitida na forma de ondas elásticas numa deformação do material, fratura ou mudança de fase relacionada com o rearranjo da sua estrutura interna como, por exemplo, tamanho de grão, densidade de discordâncias e distribuição de partículas de segunda fase no material cristalino [42,46].

No processo de usinagem, AE é atribuída a muitas origens, como deformações plásticas e/ou elásticas da peça e do material da ferramenta, atrito, fratura da peça, desgaste e quebra da ferramenta [42].

A AE fornece um meio de monitorar a quebra ou desgaste da ferramenta [2,42,47-51]. O sinal de emissão acústica é usualmente detectado por sensores, então amplificados e transmitidos a um osciloscópio, contador, voltímetro RMS, gravador ou analisador espectral. Entre várias aproximações tomadas para análise do sinal de AE, a análise espectral tem oferecido maiores informações para o monitoramento da falha da ferramenta.

Muitas pesquisas estão sendo desenvolvidas nesta área. E, embora, poucos trabalhos experimentais tem sido realizados, existe o consenso de que esta técnica aparenta ter um rápido tempo de resposta e consistente, e parece ser mais sensível para o monitoramento da falha da ferramenta do que análise da vibração da ferramenta [42].

4.1.7 Dimensões de Corte

Quando se aumenta o avanço ou a profundidade de corte, a velocidade deve ser reduzida para manter a vida da ferramenta constante. A diminuição da velocidade de corte necessária para um

aumento do avanço é maior que para um aumento equivalente da profundidade de corte [35];

- Contudo, assim procedendo, a velocidade de corte diminui numa proporção bem menor do que o aumento do avanço ou da profundidade, resultando num volume de material removido maior, para um mesmo tempo de vida.

4.1.8 Influência do Material da Peça no Desgaste da Ferramenta

O desgaste da ferramenta, decorrente da ação abrasiva do material da peça pode-se atribuir a pelo menos duas causas :

- inclusões e pontos duros presentes na microestrutura do material de usinagem;
- aumento da dureza do cavaco e da peça em virtude do encruamento decorrente do próprio processo de usinagem [35].

Se as inclusões forem muito mais duras do que o material da peça, provocam um rápido desgaste da ferramenta de corte, como se verifica, por exemplo, na presença de inclusões de óxidos de alumínio e silicatos diversos em peças de aço. Por outro lado, a presença de partículas moles, como sulfeto de manganês ou chumbo no aço, aumenta a vida da ferramenta [35].

Existe uma correlação, ainda que imprecisa, entre a dureza do material da peça e a vida da ferramenta. Observando-se a tendência nítida de uma maior dureza do material determinar um maior desgaste da ferramenta [35].

4.2 Ferramentas de Geometria Não Definida

Erros de forma e de medida no processo de retificação são decorrentes da ação da força e do desgaste do rebolo e podem ter procedência diferente em seu mecanismo de origem.

Desta forma, a análise dos mecanismos de desgaste e, principalmente, o reconhecimento destes é de fundamental importância no processo de retificação.

Durante o processo de usinagem com ferramenta de corte de geometria não definida, figura 24, tem-se inicialmente apenas deformações elásticas, posteriormente encontra-se uma região onde, devido a deformações plásticas, tem-se um escoamento do material.

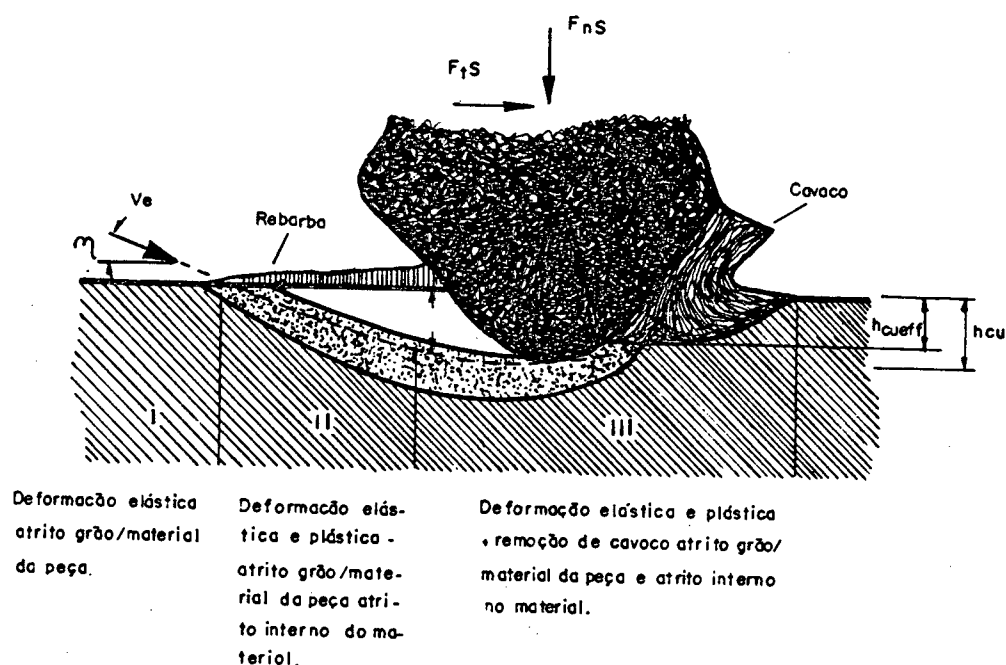


FIGURA 24: Representação esquemática do início de corte na retificação [52].

Em consequência do arredondamento do gume, o ângulo entre o contorno do gume e a superfície de trabalho no início é muito pequeno e na primeira parte não se forma um cavaco. O material

simplesmente é empurrado para os lados e se formam rebarbas, e/ou escoas por baixo do grão abrasivo no sentido do flanco do mesmo.

Quando o gume penetrou suficientemente na peça, isto é, quando a espessura de usinagem (h_{cu}) atingiu a penetração de início de corte (T_μ) é que se inicia a formação de cavacos propriamente dita.

Como daqui para frente os mecanismos de escoamento e de formação de cavacos ocorrem simultaneamente, é interessante conhecer o quanto da penetração de trabalho ou da espessura de corte (h_{cu}) realmente é aproveitada para remoção de cavaco ($h_{c\text{ueff}}$) (figura 24) e com isso, determinar a eficiência da remoção do material.

Pesquisas mostraram que a profundidade (T_μ) e a espessura de usinagem efetiva ($h_{c\text{ueff}}$) são dependentes da geometria do gume, do ângulo de ação (η), sob o qual o gume penetra na peça e da velocidade de ação (v_e), com a qual o gume se desloca. Além disso, ($h_{c\text{ueff}}$) e (T_μ) dependem das relações de atrito no gume e das condições de escoamento do material da peça. Tendencialmente, pode-se que gumes cegos com um pequeno grau de afiação e com um pequeno ângulo de ação propiciam o escoamento o escoamento do material levando a maiores penetrações de início de corte e também a menores espessuras efetivas de corte. Também um aumento de tensão de escoamento do material tem efeito semelhante. O atrito entre o grão abrasivo e o material da peça tem efeito contrário. O aumento do atrito provoca um estado de tensão mais intenso abaixo do gume e propicia a formação de cavacos [52].

A emissão acústica no processo de retificação é uma consequência do grande número de grãos, que penetram sequencialmente na superfície da peça, superpondo os mecanismos

de formação de cavaco. De acordo com a quantidade de material que é removido com cada grão, em dependência dos fatores citados acima, a emissão acústica varia.

A força de usinagem que atua sobre o gume durante a fase de ação do grão abrasivo pode ser subdividida em uma componente no sentido de corté (F_{ts}) e em uma componente (F_{ns}) normal à (F_{ts}).

A força tangencial e a força normal não podem ser medidas isoladamente para cada grão abrasivo e sim são medidas na ação conjunta dos grãos atuantes do rebolo. Com a variação dos mecanismos de formação de cavacos, mudam as grandezas de forças, bem como a relação entre as forças F_{ts}/F_{ns} .

4.2.1 Formas de Desgaste

Inicialmente pode-se fazer distinção entre desgaste e perda de afiação (ou agressividade) do rebolo. O desgaste é a quantidade de rebolo consumida durante um determinado ciclo ou operação, enquanto que a perda de afiação é decorrente do arredondamento dos gumes e/ou do entupimento das porosidades com cavacos (empastamento). É interessante observar que um rebolo pode sofrer desgaste sem perder afiação (e vice-versa) [53].

O desgaste total de um rebolo aumenta com o tempo de corte. Ele pode ser subdividido em uma diminuição do raio do rebolo e em desgaste na quina do rebolo (figura 25). As duas formas de desgaste podem ser utilizadas como critério de fim de vida e, com isto, determinam o ponto em que será necessário um novo dressamento. A quantidade de material que deverá ser dressada no rebolo, de uma forma geral, corresponde ao desgaste de quina (Δr_{sk}) no sentido radial [52].

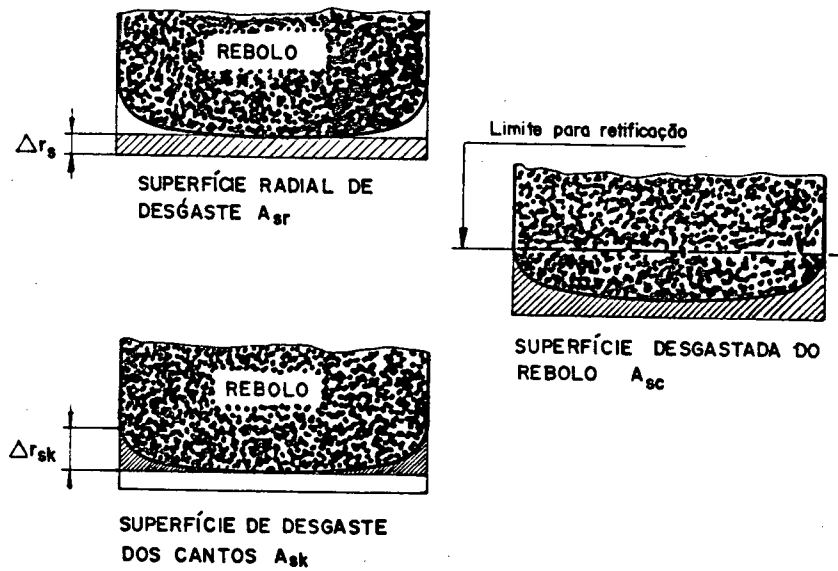


FIGURA 25: Medição de desgaste em rebolos [49].

4.2.2 Mecanismos de Desgaste

O efeito conjunto de elevadas pressões e temperaturas levam, microscopicamente, a um desgaste nos grãos e no ligante, conforme ilustrado na figura 26.

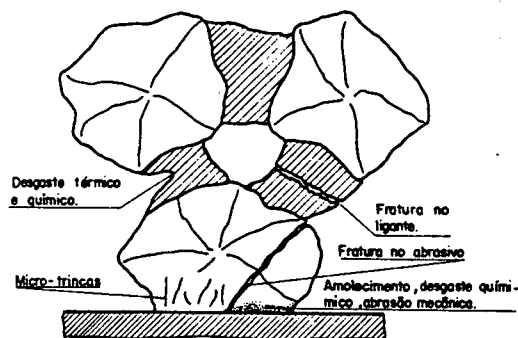


FIGURA 26: Mecanismos de desgaste no grão ligante [49].

O desgaste do grão tem início nas camadas cristalinas próximas a camada superficial do grão abrasivo. Nessas camadas, as pressões e temperaturas extremamente altas levam a fenômenos de oxidação e de difusão que reduzem a resistência abrasiva do material. Forma-se uma camada menos resistente à compressão que devido à ação mecânica subsequente é removida por abrasão e com isto, novas camadas cristalinas do grão abrasivo estão sendo submetidas a este tipo de desgaste.

Alem disso, pela ação mecânica e térmica alternante é possível ocorrer uma fadiga da estrutura cristalina em locais com falhas que podem ser encontrados em todo material (na forma de impurezas na estrutura cristalina, em contornos de grãos, variações de dureza, etc), onde principiam fissuras de fadiga. Essas fissuras podem propagar-se e levar ao lascamento de partes do grão ou podem provocar a formação de um macrofissura que pode levar ao fissuramento de grandes partes dos grãos abrasivos [52].

Em muitos casos o desgaste dos grãos é causa imediato para o desgaste do ligante, pois devido ao achatamento do gume tem-se um aumento da força de atrito, que leva a um aumento localizado da força de corte e com isto, ultrapassa-se a resistência mecânica do ligante. É possível ocorrer a quebra de vários grãos em cadeia. Dependendo de como o grão está ancorado no ligante, esse desgaste pode estar mais localizado no grão ou mais no ligante. O ligante também pode sofrer um desgaste sem a atuação do grão abrasivo, diretamente pela ação química ou térmica do meio.

Em resumo, tem-se os dois mecanismos seguintes como causa para os microdesgastes:

- O cegamento dos grãos isolados, decorrente do desgaste abrasivo pela adesão, corrosão e difusão e por microfissuramento condicionado pelas tensões residuais térmicas;
- A quebra de grãos inteiros, decorrente da solicitação excessiva do ligante, bem como pela ação térmica ou química sobre o ligante.

A interligação desses mecanismos de desgaste caracteriza o comportamento de desgaste do rebolo.

Para a comparação do comportamento de desgaste de um rebolo tem-se um valor importante, a velocidade de desgaste radial Δr_g .

O desgaste radial está relacionado a um volume usinado pré-determinado, enquanto que a velocidade de desgaste radial Δr_g está relacionado a taxa de retificação específica e com isso também à duração de utilização do rebolo.

Define-se Taxa de Retificação Específica (Q') como sendo o volume usinado na unidade de tempo por mm de largura do rebolo. Não depende da velocidade de corte e sim da velocidade de avanço e da penetração do rebolo.

A figura 27 mostra a influência da taxa de retificação específica (Q') sobre a velocidade de desgaste radial, como também os mecanismos de desgaste correspondentes. Na faixa de taxas de retificação específicas pequenas, tem-se o domínio do desgaste abrasivo e micro-lascamento, ao passo que com um aumento de (Q'), o fissuramento de pedaços maiores dos grãos caracterizam mais as formas de desgaste, inclusive chegando a quebra total de grão [54].

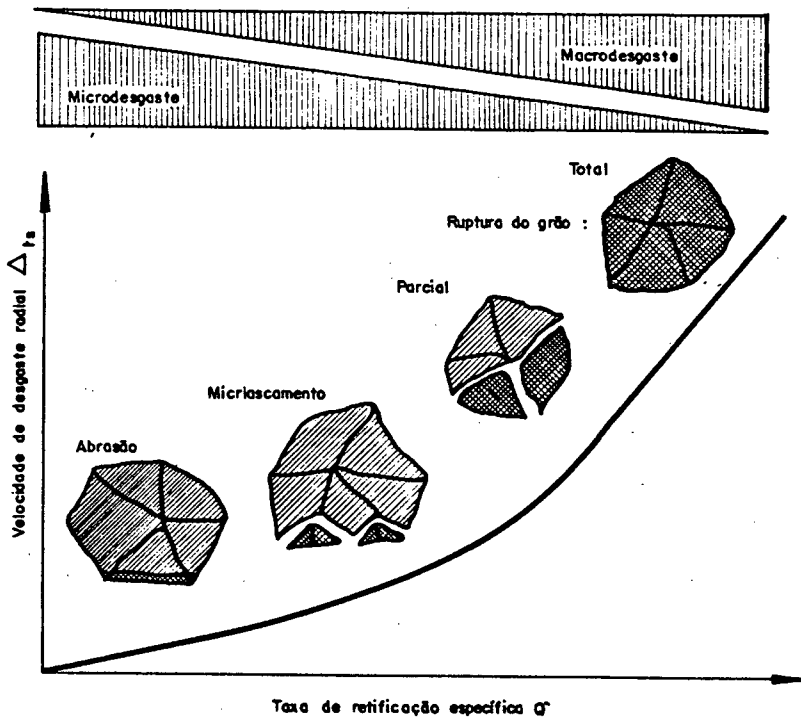


FIGURA 27: Influência da taxa de retificação específica sobre a velocidade de desgaste radial, bem como os mecanismos de desgaste correspondentes [49].

A figura 28 mostra os resultados da influência da taxa de retificação específica sobre a velocidade de desgaste. Nesse caso, a velocidade de desgaste propositadamente foi multiplicada pelo diâmetro do rebolo.

Uma comparação da velocidade de desgaste radial com o desgaste radial é mostrado na figura 29. Nessa figura, o volume retificado é constante, de forma que com uma taxa de retificação específica (Q') crescente o tempo de corte diminui.

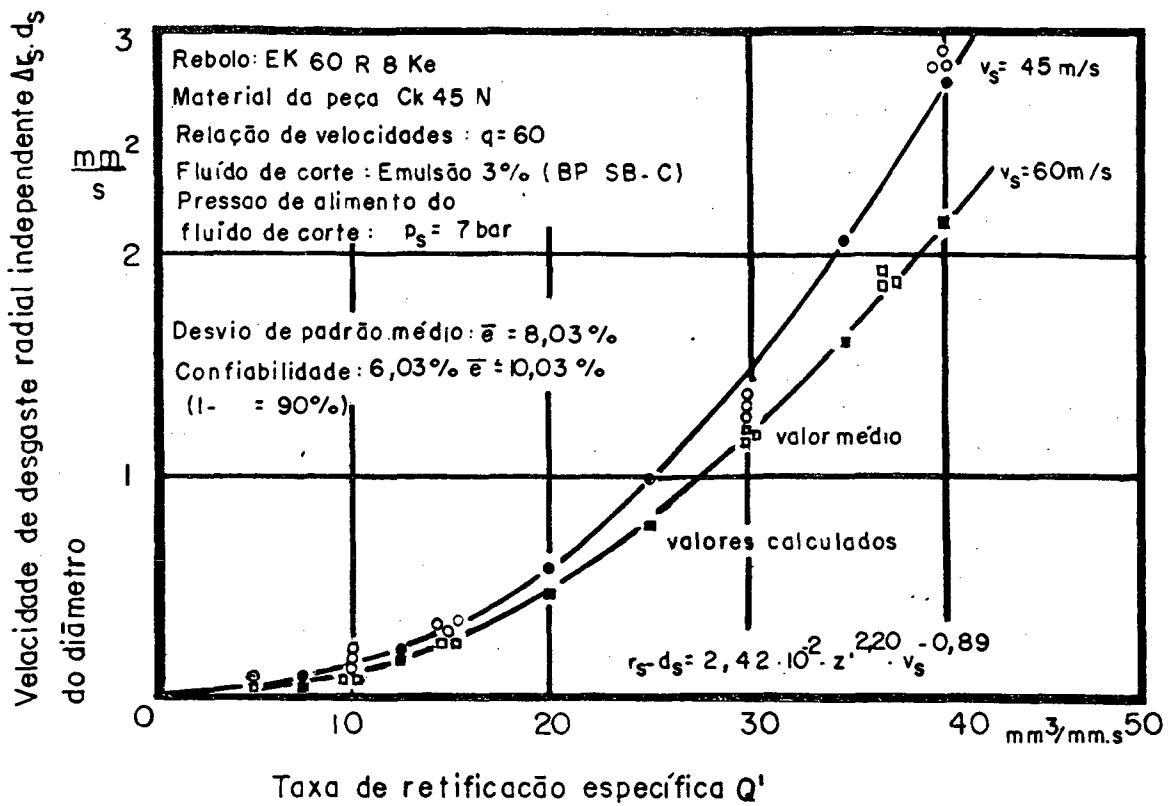


FIGURA 28: Dependência funcional da velocidade de desgaste radial, corrigida da taxa de retificação específica e da velocidade de corte [55].

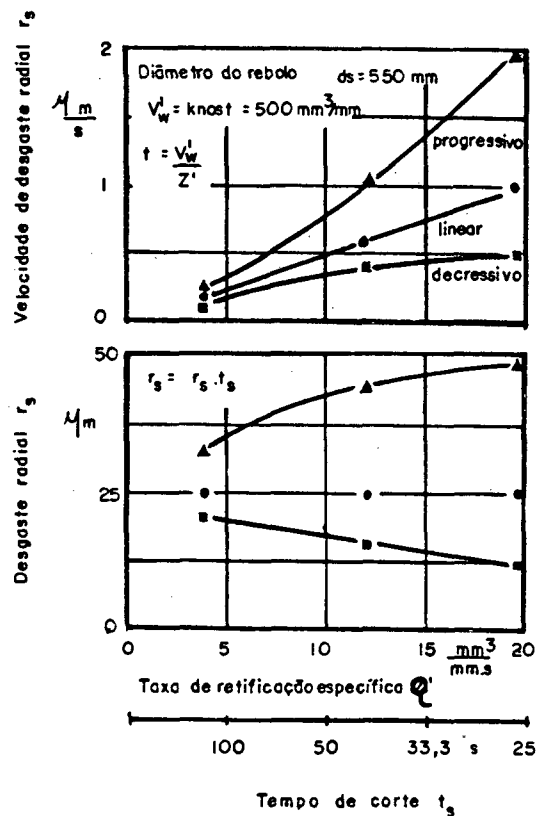


FIGURA 29: Dependência entre a velocidade de desgaste radial em relação a taxa de retificação específica [56].

Na unidade de tempo a diminuição do raio Δr_s não é constante, e sim o volume desgastado do rebolo é que é constante. Desta forma, com a diminuição do diâmetro do rebolo (d_g), o degaste leva a uma velocidade crescente de desgaste (Δr_s), só o produto de (d_g) e (Δr_s) independe da variação do diâmetro e permite uma comparação da velocidade de desgaste radial.

Para um aumento progressivo da velocidade de desgaste radial, na figura 29 o desgaste radial aumenta decressivamente. No entanto, tendo-se um aumento linear de (Δr_s) em relação a taxa de retificação específica (Q'), o desgaste radial em decorrência do tempo de corte reduzido permanece constante. Se o aumento da velocidade de desgaste radial for decrescente para um aumento da taxa de retificação específica (Q'), então o desgaste radial pode até diminuir [56].

Velocidades de corte mais elevadas, geralmente levam também a um desgaste de quina reduzido, figura 30 [52].

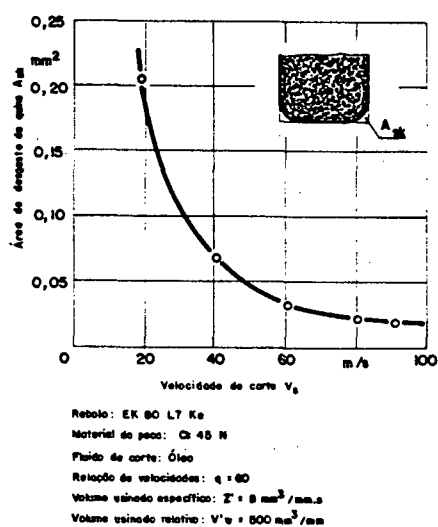


FIGURA 30: Desgaste de quina de um rebolo em dependência da velocidade de corte [52].

Pela diminuição da seção do cavaco, reduz-se também a solicitação sobre o rebolo. As velocidades de atrito crescente, bem como a frequência de utilização de um gume crescente, são hipercompensadas pela diminuição do tempo de ação de um gume. Em algumas excessões é possível empregar rebolos com baquelite, sendo possível observar um crescimento do desgaste em decorrência da solicitação térmica excessiva quando se ultrapassa uma certa velocidade limite.

4.2.3 Influência do Fluido de Corte no Desgaste do Rebolo

O fluido de corte deve atender as seguintes funções:

- Redução do atrito entre grão e material através da formação de uma película estável de lubrificante.
- Refrigeração da superfície do material.
- Limpeza e unção do rebolo.
- Proteção à corrosão para máquina e peça.

Pelo lado tecnológico resulta aqui a necessidade de uma combinação favorável de capacidade de transmissão térmica e de calor específico assim como boas propriedades de lubrificação. Além disso, na prática são importantes a inibição de espumas, uma pequena tendência a formação de névoa, uma boa estabilidade e não ser tóxico [57].

A influência do fluido refrigerante sobre o desgaste do rebolo é mostrado na figura 31. O volume do desgaste do rebolo aumenta com o aumento da taxa de retificação de forma menos acentuada quando se emprega óleo e de forma mais acentuada quando se empregam emulsões aquosas. Pela adição de aditivos de extrema

pressão (EP), o efeito lubrificante do óleo pode ser melhorado e o desgaste do rebolo ser diminuído mais ainda [52].

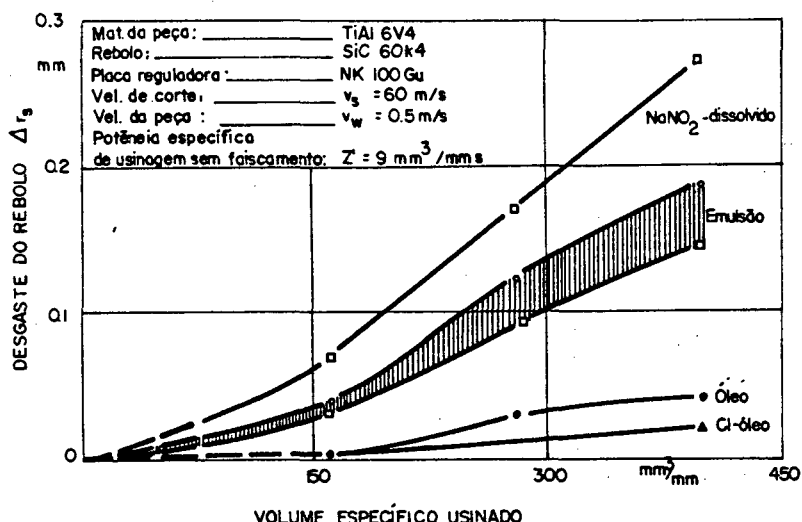


FIGURA 31: Desgaste do rebolo em dependência do volume usinado específico e do fluido de corte empregado [52].

Um aumento significativo do comportamento de remoção só é possível com a utilização de óleo de retificação. A ação inibidora de desgaste dos aditivos cloro e enxofre também só aparece nos óleos de retificação. Notável é aqui o fato que o percentual de 9,6 % de enxofre provoca uma diminuição do desgaste maior do que uma adição de 20 % de cloro [57].

Como os sabões metálicos formados pelas ligações de enxofre possuem uma maior resistência a temperatura do que as camadas intermediárias oriundas dos aditivos de cloro, este resultado deve ser visto como a confirmação do significado central da resistência a pressão e temperatura da película lubrificante em vista a um bom comportamento de desgaste [57].

Não só o tipo de fluido de corte (figura 31) mas também a potência do sistema de alimentação do fluido de corte tem importância marcante no processo de retificação.

A figura 32 mostra um sistema no qual uma tubeira leva o fluido de corte diretamente à fenda de trabalho e uma série de tubeiras adicionais estão dispostas em torno do rebolo.

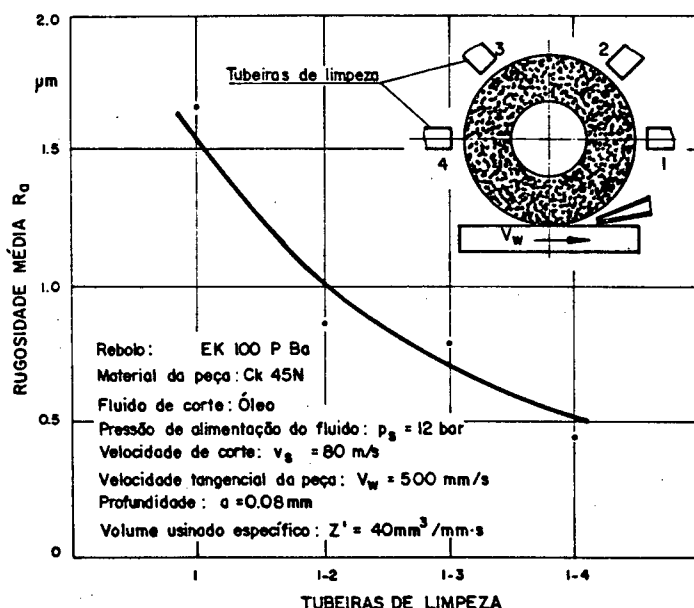


FIGURA 32: Influência da disposição do número de tubeiras de limpeza sobre a qualidade da superfície na retificação plana [49].

Elas têm a finalidade de fazer a limpeza da superfície do rebolo. O efeito da limpeza pode ser verificado pela melhora na qualidade superficial com o aumento do número de tubeiras sobre a periferia do rebolo [52].

Em resumo resultam as seguintes tendências:

- Com o aumento da dureza do rebolo é possível melhorar o comportamento de remoção em todos os fluidos de corte.
- Óleos de retificação de alta liga permitem, em comparação a fluidos de corte solúveis em água, taxas de remoção

significativamente maiores.

- A influência vantajosa do óleo de retificação é menos perceptível nos rebolos de corundum em comparação com os rebolos de SiC [57].
- Altas taxas de cloro e enxofre nos óleos de retificação levam por causa da alta ação lubrificante a uma significativa diminuição do desgaste [57].

4.2.4 Influência do Tipo do Rebolo sobre o Desgaste

No desgaste do rebolo deve-se diferenciar entre desgaste do grão e desgaste do ligante. Esta divisão é tão mais importante quanto mais diferentes as propriedades físicas e químicas do grão e do ligante. Assim, por exemplo, num rebolo ligado por cerâmica de corundum, grão e ligante possuem propriedades parecidas e com isto um comportamento similar de desgaste, enquanto que no rebolo ligado com resina existem outros mecanismos de colagem entre grão e ligante como também diferentes reações em relação a pressão e temperatura.

A resistência de desgaste do rebolo é determinada através das propriedades do grão e do ligante assim como a resistência da ligação entre estes dois elementos. Mesmo sendo complicado de se analisar as ocorrências físicas e químicas no grão durante a usinagem, por causa do tempo de contato extremamente curto (10^{-5} a 10^{-6} s) e da alta temperatura na zona de formação de cavaco, é possível diferenciar tipos característicos de desgaste.

Um comportamento simultâneo de desgaste do grão e do ligante é característico para o comportamento de corte de um rebolo, já

que a quebra a tempo certo dos grãos cegos e a liberação de novos gumes realiza o chamado efeito de auto-afiação.

Malkin [58] diz que o volume de desgaste de um rebolo é de cerca de 80 por cento do desgaste do ligante. Visto que somente 4 por cento do volume do rebolo são removidos pelos grãos e sua quebra, esta parte é determinante para o desgaste total, já que um achatamento dos grãos aumenta as forças de corte e com isto leva a uma maior solicitação de grão e ligante.

A parte relativamente pequena dos grãos removidos comanda assim o desgaste total do rebolo, o qual é baseado principalmente em quebra de grão e ligante, quando não aparecem uma alta afinidade entre rebolo e elementos do material o que leva a um desgaste químico bastante alto.

Para melhorar a colagem dos grãos de diamante (D) e de nitreto de boro cúbico (CBN) nos ligantes de resina, e também diminuir a solicitação térmica dos ligantes, muitas vezes estes são providos de um manto metálico. Muitos grãos se soltam do seu manto após um certo desgaste primário, o qual permanece no ligante.

Um aproveitamento mais efetivo da parte dos rebolos CBN e D seria seguramente alcançável através de uma melhor fixação do recobrimento no grão, por um lado, assim como do recobrimento no ligante, por outro, satisfazendo assim as condições exigidas.

Os aparecimentos de quebra presentes nos rebolos de carboneto de silício dependem principalmente da sua estrutura. Com o aumento do ligante, isto é, aumento de densidade da estrutura, aparecem menos quebras no ligante, o que deve ser relacionado às pontes de ligante mais curtas e simultaneamente mais grossas.

Como além das propriedades do rebolo, muitas vezes também é necessário observar o comportamento estático e dinâmico da máquina na escolha do rebolo, uma especificação adequada do rebolo para casos específicos, mesmo com o conhecimento do módulo de elasticidade, só pode ser feito empiricamente. Assim, por exemplo, os ensaios realizados na retificação em placa, o aumento da dureza do rebolo mostrou-se problemático. Esta medida significa ao mesmo tempo uma redução da elasticidade e da capacidade de absorção do rebolo, o que aumenta significativamente o perigo de um processo de retificação instável. Em lugar de uma diminuição do desgaste, neste caso pode aparecer uma piora da qualidade superficial e até um aumento do desgaste. Num processo estável de retificação o aumento da dureza do rebolo com a permanência das outras propriedades constantes leva a uma pequena redução do desgaste.

Uma pré-determinação das reações químicas, entre grão e material, mostrou-se por causa da alta solicitação térmica e em relação a pressão, as quais não são mensuráveis exatamente em relação ao lugar e ao tempo dos gumes isolados, como muito difícil.

Algumas ligas como as de resina possibilitam a adição de substâncias formadoras de películas de lubrificação, as quais até hoje são fornecidas à zona de contato entre rebolo e peça através de fluidos de corte.

Deve-se observar, que a escolha de um rebolo com aspectos favoráveis em relação ao desgaste pelos pontos de vista a seguir e não pelas condições de regulagem e do fluido de corte:

- Ajuste do grão e do material ligante às propriedades físicas e químicas do material da peça,

- Determinação da dureza do rebolo e da sua estrutura em vista a qualidade de superfície da peça assim como o processo de retificação utilizado.

4.2.5 Efeito do Empastamento do Rebolo

As informações sobre o efeito do empastamento do rebolo são poucas e contraditórias. É fato, que os rebolos empastados aumentam as forças de corte e que o esforço térmico da zona periférica da ferramenta aumenta. Isto se deve à dificuldade de formação de cavaco nos gumes, principalmente sob a diferente condição de atrito. Schofield e Khudobin [59] mostraram através de medições, um aumento simultâneo do empastamento do rebolo e das forças de corte na fase inicial do processo de retificação. É justamente nesta fase que a geometria de espaço entre os gumes sofre uma mudança contínua, o que dificulta uma classificação exata do aumento das forças de corte.

Sperling [60], por sua vez, conseguiu demonstrar a relação entre empastamento do rebolo e as marcas de revenido na superfície da peça. Para isto utilizou-se um sistema de refrigeração onde somente uma parte da superfície do rebolo foi lubrificada e limpa com fluido de corte.

Existem várias opiniões sobre a influência do empastamento sobre a rugosidade superficial. Schofield e Tripathi [61] determinaram uma piora da qualidade superficial com o aumento do empastamento do rebolo. Também no processo de retificação de cilindros de calandras é conhecido que algumas partículas de empastamento resultam em formações de riscos que destroem a retificação espelhada.

CAPÍTULO 5

DESENVOLVIMENTO E TENDÊNCIAS DO MONITORAMENTO E CONTROLE DO PROCESSO DE USINAGEM

O uso de modernas máquinas ferramenta com comando numérico (CNC) com condições mínimas de atenção e sem operadores no terceiro turno ou nos finais de semana e feriados, requerem sistemas de controle e monitoramento com o objetivo de reconhecer perturbações durante o processo e prevenir colisões e danos de ferramentas, peças e máquinas ferramenta.

A melhoria do controle do processo é requisitado com a condição de reduzir os custos pela redução do tempo improdutivo de máquinas ferramentas caras. A figura 33 mostra a importância vital da operação de máquinas ferramentas CNC e NC sob condições de mínimo custo de usinagem.

Em decorrência dos investimentos elevados na instalação destas máquinas, associado aos salários elevados dos operadores especializados a curva da parcela do custo homem/máquina ferramenta apresenta um maior gradiente que a curva respectiva para máquinas ferramentas convencionais. Consequência disto é que o custo de produção apresenta uma maior sensibilidade à variação da velocidade de corte e a definição dos parâmetros otimizados deve ser feita com maior cuidado, sob o risco de os custos de produção em máquinas CNC poderem exceder os custos dos métodos convencionais. Como a curva de custo é também influenciada pelo custo das ferramentas que em velocidades de corte maiores, empregadas em máquinas ferramenta CNC, apresentam um desgaste mais rápido e a flutuação da vida das ferramentas leva a um fator

de insegurança na determinação da velocidade de corte de mínimo custo. Os sistemas de monitoramento são necessários para se obter resultados satisfatórios sob esta condição crítica.

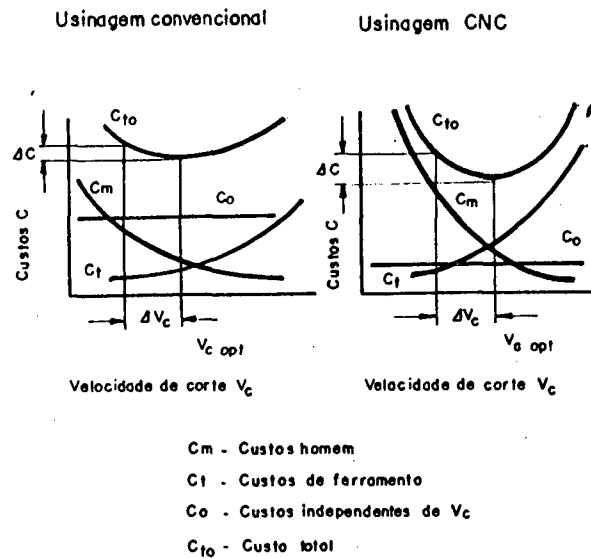


FIGURA 33: Custos de usinagem por produto como uma função da velocidade de corte [6].

Os sistemas de monitoramento são usados tanto para pequenos lotes como para produção unitária. A produção de pequenos lotes com um pequeno número de operações repetitivas, necessitam de um alto nível de organização e preparação. Isto tem aumentado a importância da capacitação da máquina ferramenta para produzir a primeira peça de um lote com segurança de acordo com as especificações dadas.

Consequentemente, os sistemas de monitoramento são utilizados nas condições onde se requer:

- Obtenção de segurança
- Prevenção de danos inevitáveis
- Prevenção de refugos

- Prevenção de perda de equipamento. e
- Obtenção de otimização dos recursos.

A relação do monitoramento com a máquina ferramenta, ferramenta, condições da ferramenta e peça está mostrado na tabela 1.

	TEMPO CRÍTICO	TEMPO NÃO-CRÍTICO
MÁQUINA	<ul style="list-style-type: none"> • Controle CNC • Colisão 	<ul style="list-style-type: none"> • Precisão • Deformação térmica
FERRAMENTA	<ul style="list-style-type: none"> • Fratura da ferramenta • Aproximação da ferramenta 	<ul style="list-style-type: none"> • Desgaste da ferramenta • Presença da ferramenta
PROCESSO	<ul style="list-style-type: none"> • Vibração • Força, torque, potência • Formação de cavaca 	<ul style="list-style-type: none"> • Fluido de corte
CONDICIONAMENTO DA FERRAMENTA	<ul style="list-style-type: none"> • Dressamento 	<ul style="list-style-type: none"> • Compensação da ferramenta
PEÇA	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensão em processo • Forma em processo • Rugosidade em processo 	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensão da peça bruta • Material da Peça • Integridade Superficial

TABELA 1: Condições atuais do monitoramento no processo de usinagem (tempos críticos e não críticos) [06].

A tabela 1 mostra a relação do monitoramento com a máquina ferramenta, ferramenta, processo de usinagem, condições da ferramenta e peça. Esta tabela também mostra eventos, funções e condições de objetos de monitoramento e controle que são divididos em dois grupos: tempos críticos e tempos não críticos. A operação de tempo crítico requer uma resposta do sistema em milissegundos, enquanto que o tempo não crítico as operações podem levar segundos e às vezes minutos. Por exemplo, a fratura da ferramenta e aproximação da ferramenta é crítico, e o desgaste da ferramenta e a presença da ferramenta é não crítico.

O monitoramento de um processo ou de uma ferramenta se baseia no reconhecimento da variação de uma grandeza física correlacionada com a perturbação em questão.

A figura 34 mostra a estrutura de um sistema de monitoramento e controle sob os aspectos de sensores, condicionamento do sinal, modelos e estratégias.

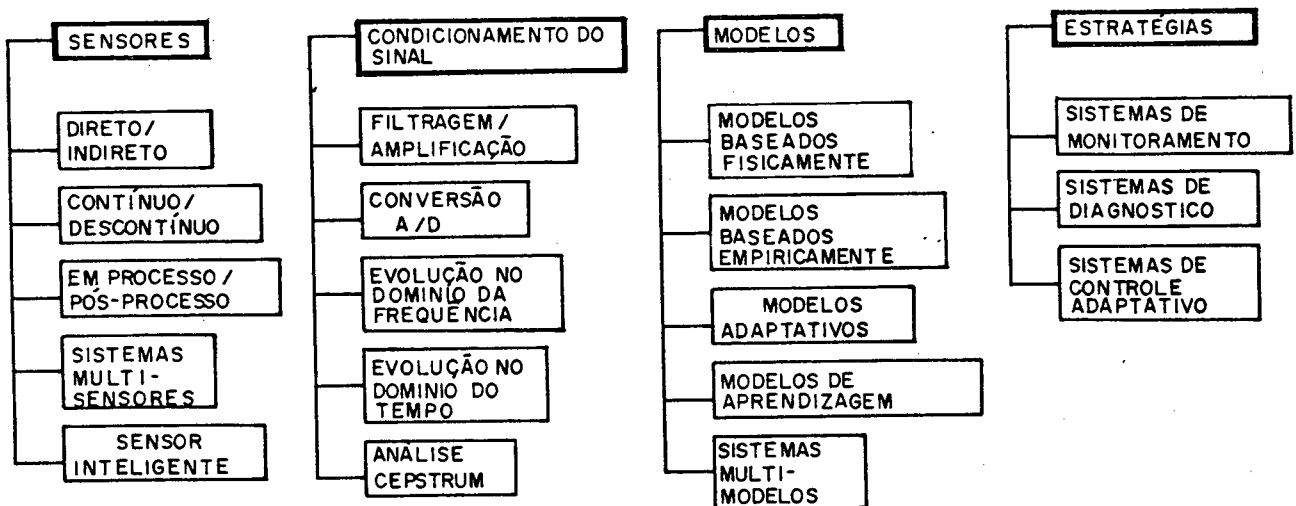


FIGURA 34: Estrutura de um sistema de supervisão [62].

5.1 Sensores

Os sensores tem por finalidade, com o auxílio de um procedimento de medição adequado, determinar uma grandeza dependente do desgaste para poder concluir sobre o estado de desgaste atual da ferramenta de corte, bem como da quebra da ferramenta [8,43].

A condição de obter-se o potencial completo de máquinas ferramenta CNC e NC sem operador exigiu o desenvolvimento de sensores, que produzem a informação básica para o processamento do sinal, que obedecessem as seguintes exigências [1,2,6,41-44]:

- Nenhuma influência sobre as propriedades da máquina ferramenta (rigidez estática e dinâmica);
- nenhuma influência sobre o processo de usinagem (local de

trabalho, condições de corte):

- função independente da ferramenta e propriedades da peça (forma, tamanho, material, superfície);
- pequena susceptibilidade à perturbações e elevada certeza de funcionamento (insensibilidade para fluido de corte, cavacos, sujeira, influência de vibrações e temperatura);
- funcionamento com pouco desgaste e reparos;
- forma construtiva compacta;
- operação fácil; e
- custo baixo.

Na escolha de sistemas adequados de medição, bem como de sensores para o reconhecimento dos limites de desgaste e dos limites de quebra, pode-se recorrer a sistemas de medição existentes na área de controle adaptativo [1,6,44]. Deve-se ainda considerar que os sensores devem ter condições de serem aplicados em um maior número possível de processos e condições de usinagem [22].

Desta forma, no uso de sensores, conforme figura 34 [62], pode-se distinguir:

5.1.1 Princípio Físico dos Sensores

Os sensores para o monitoramento e controle do processo podem apresentar os seguintes princípios físicos:

- Óptico
 - Reflexão
 - fibra óptica
 - câmera de TV
- Elétrico

- Indutivo
- Capacitivo
- Resistivo
- Mecânico
 - Pneumático
 - Hidráulico
 - Acústico
- Radioativo
- Piezelétrico
 - Carga
 - Frequência

Os sensores piezelétricos são bastante utilizados. Seu princípio de funcionamento ocorre da seguinte forma: As cargas eletrostáticas decorrentes da aplicação das componentes da força de usinagem são transformados em sinais de tensão por amplificadores e alimentados ao sistema eletrônico de monitoramento, que executa a função propriamente dita de monitor.

Atualmente as cerâmicas e quartzos piezelétricas estão sendo largamente utilizadas.

5.1.2 Aplicação Técnica dos Sensores

A aplicação técnica dos sensores pode ser das seguintes formas:

- direto ou indireto
- contínuo ou intermitente
- pós ou em processo.

Pode-se também distinguir entre Controle de entrada e Controle de saída.

Os sistemas que monitoram, por exemplo, as condições de espaço vazio, ferramentas de corte, máquinas ferramenta e equipamentos de usinagem são chamados de sistemas de controle de entrada. Em muitos casos, esses sistemas rejeitam condições simples de entrada que não satisfazem os requisitos. Sistema de controle de saída monitoram as condições da peça após a usinagem.

A aplicação técnica dos sensores com medição intermitente ao lado da máquina ferramenta não pode ser empregada para a quebra por causa do retardo considerável entre a ação, por exemplo a quebra da ferramenta, e seu reconhecimento.

Também no ambiente de trabalho da máquina ferramenta uma medição entre ciclos de operação ou após uma operação, também leva a um retardo considerável em relação aos objetivos do monitoramento. Quebras de ferramentas podem ser reconhecidas nesses intervalos de forma bastante simples, por exemplo, pela apalpação mecânica do suporte da ferramenta, no entanto, aqui já não se pode mais evitar os custos consequentes. Também o reconhecimento do fim de vida da ferramenta pela medição do desgaste da ferramenta durante a interrupção do corte, em princípio, é possível, no entanto, necessita de tempos secundários complementares. Com isso, ocorre uma redução da produtividade da máquina ferramenta e um aumento dos custos das peças. Como consequência disso, a sua utilização não é rentável.

Pelos motivos aqui citados, uma medição intermitente para o sistema de monitoramento não parece adequada. Em decorrência disso, devem ser utilizados processos de medição contínua, que permitem uma determinação direta ou indireta das características de desgaste ou da quebra da ferramenta.

DIRETO, onde o desgaste atual é medido

INDIRETO, onde um parâmetro correlacionado com o desgaste é medido.

As duas figuras subseqüentes mostram sistemas de medição direta e indireta, que são adequados para a utilização contínua no processo de torneamento, mas que pode ser extrapolado para outros processos de usinagem.

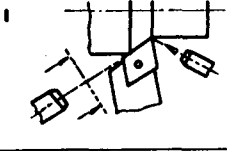
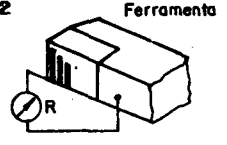
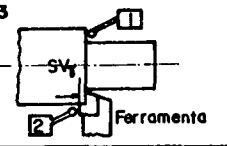
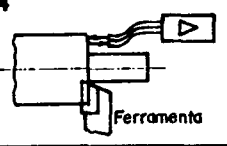
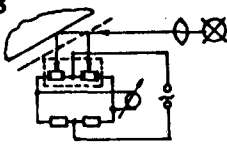
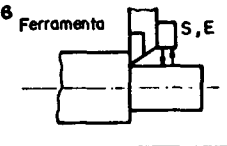
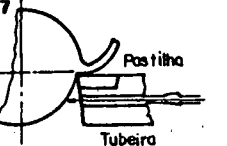
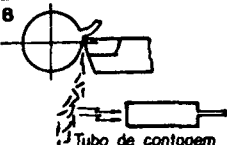
Marca de desgaste VB	1		Medições opto-eletrônicas do desgaste. Fenda de luz na forma de cunha abaixo do gume da ferramenta se modifica de acordo com a variação de VB. Ele é transmitido com uma fibra óptica para o sensor e avaliado eletronicamente. /74/
	2		No flanco são aplicadas fitas de resistência. (fitas singulares /75/ fitas múltiplas /72/). O desgaste de flanco VB leva ao desgaste dessas fitas e com isso à variação de sua resistência elétrica R.
Deslocamento do gume SV _f	3		O apalpador 1 fornece um sinal proporcional ao deslocamento do gume SV _f . O apalpador 2 serve para a compensação de deformações mecânicas provocadas pela influência da temperatura. (Apalpadores mecânicos /76/, apalpadores indutivos /77/).
	4		Medição óptica do deslocamento do gume. Variações de afastamento entre a saída e a entrada da luz e a peça levam a variações da intensidade da luz refletida. /78/
	5		Sensor opto-eletrônico de desgaste. Um feixe de laser é refletido pela superfície da peça. O deslocamento da superfície de reflexão de corrente do desgaste é determinado. /77/
	6		Determinação do deslocamento do gume no flanco secundário (figura) ou no flanco principal por um impulso de ultrassom leva a variações no tempo de detecção. Um deslocamento do gume leva a uma variação do percurso entre impulso e sensor receptor.
	7		Sensor de desgaste pneumático ou hidráulico pelo princípio da tubeira sobre superfície. Variações no afastamento entre peça e tubeira levam a uma variação da pressão no sistema /77, 79, 80/
Volume de desgaste	8		Medição de desgaste radioativa. Pela irradiação ou pela soldagem de ferramenta ativada sobre um suporte, as partículas removidas pelo desgaste passam quase que exclusivamente para os cavacos. A radioatividade dos cavacos é medida. /81, 84/

FIGURA 35: Processo de medição para a determinação direta do desgaste de uma ferramenta durante o torneamento [1].

As vantagens dos processos para medição direta das grandezas de desgaste (figura 35) estão no fato destes permitirem uma alta precisão de medição - dependendo do processo de medição - e permitem determinar com certeza uma certa forma de desgaste seja desgaste de flanco, de cratera, ou ambas, etc.. A esta vantagem se contrapõem a desvantagem de que os equipamentos para a medição do desgaste devem ser instalados direta e juntamente à região de usinagem (processos 1, 3-6). As perturbações decorrentes da ação direta de cavacos, sujeira, fluido de corte e vibrações são consideráveis. Além disso, os processos de medição 3-5 exigem uma adaptação do ajuste dos sensores para uma variação do diâmetro que está sendo usinado.

Além disso, os processos de medição 1, 4 e 5 só podem ser usados num processo de usinagem como o fresamento, onde o gume não está em contato com a peça durante mais do que meia rotação da fresa, e assim a superfície pode ser exposta ao feixe de luz [44].

O processo de medição 3, embora possa detectar o desgaste da ferramenta pela redução do diâmetro, não é capaz de diagnosticar outros tipos de falha da ferramenta. Por exemplo, não é possível distinguir entre um desgaste de flanco e um desgaste de quina com essa técnica [42]. Apesar da utilização de um sensor (2) para compensar as deformações mecânicas provocadas pela influência da temperatura, outros fatores influenciam na medição do desgaste [44]:

- a deflexão da ferramenta devido a força de usinagem;
- a deflexão ou vibração do material da peça;
- precisão insuficiente da máquina ferramenta; e
- irregularidades da superfície usinada.

Os processos de medição 2, 7 e 8 não são afetados pelas perturbações acima citadas. Eles representam os processos mais práticos para a determinação do desgaste durante o processo de usinagem. Apesar disso, a sua aplicação prática é influenciada de forma negativa pelos fatos citados a seguir:

O processo 2 necessita do emprego de pastilhas revestidas com linhas ou fitas de resistências elétricas e, em decorrência disso, são muito caras. Só pode-se determinar o desgaste a partir de uma certa espessura mínima de usinagem [1]. O uso deste tipo de sensor, que pode ser comprovado na prática, apresenta problemas com a variação da força de usinagem que poderiam prejudicar a resistência de contato no flanco e desta forma introduzir componentes estranhas na medição [42]. O cabo elétrico na haste da ferramenta dificulta a troca manual e, de sobremodo, a troca automática da ferramenta [1]. Sendo ainda que este processo possui somente aplicação no processo com ferramenta não-rotativa, caso do torneamento [6,44]

O sensor hidráulico ou pneumático de desgaste (processo 7) se satisfaz com pastilhas padronizadas e exige apenas uma modificação na haste da ferramenta. No entanto, deve-se realizar um trabalho pneumático e hidráulico considerável para realização das medições. Também, aqui, o acoplamento das tubulações à haste da ferramenta dificulta a troca de ferramentas. A aplicação deste processo é restrita para diâmetros pequenos e exclusivamente para ferramentas com ângulo de posição χ com aproximadamente 90° [1]. Além disso, sua sensibilidade pode ser influenciada pelas seguintes variáveis: Temperatura da superfície de trabalho, qualidade superficial, fluido de corte e o diâmetro da peça durante as operações [42]. No início da década de setenta, na

Universidade Técnica de Aachen, WZL, foi desenvolvido um sensor pneumático para medição do desgaste "on-line" do rebolo na retificação. O desgaste do rebolo resultava em um aumento do "gap". Desta forma, atuava o sistema de controle do motor de passo com o objetivo de reduzir o "gap" com a largura do passo de $1\text{ }\mu\text{m}$ para o rebolo até que um valor pré-determinado fosse alcançado. Com um processamento adequado dessa informação tinha-se conhecimento do desgaste radial do rebolo e quando atingia-se o desgaste pré-determinado, era realizado o dressamento do rebolo [44].

A medição de desgaste radioativo (processo 8) não necessita de cabos perturbadores, no entanto, necessita de pastilhas radioativas preparadas especificamente e, em decorrência disso, caras. O processo não está limitado para certas geometrias ou condições de corte. O processo é adequado para a determinação da velocidade de desgaste em nível laboratorial. Apesar da dosagem ínfima de radiação, este processo não é adequado para a prática industrial, já que uma radioatividade restante na superfície da peça e dos cavacos não é admissível. O respeito de todas as normas de proteção contra radiação para pessoas que manejam o fluido de corte e cavacos levaria a custos não admissíveis [1,42,44].

Em contrapartida as possibilidades para a medição direta do desgaste, os processos de medição indireta (figura 36) apresentam uma precisão de medição menor. Pela medição da variação de uma grandeza proporcional ao desgaste, muitas vezes estes processos permitem apenas verificar uma forma total de desgaste, isto é, a soma de todos os desgastes simultaneamente (processos 2-4). Na literatura, na maioria das vezes, as grandezas analisadas

geralmente se referem a variação da grandeza a uma variação da marca de desgaste VB com uma correlação correspondente.

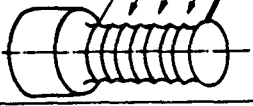
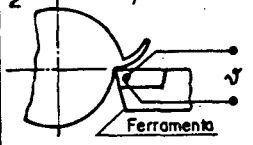
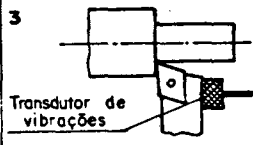
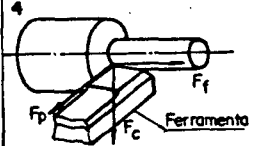
Rugosidade da peça.	1 	Com o auxílio do processo de medição de rugosidade com o feixe de luz é determinada a rugosidade da superfície da peça com avaliação eletrônica. A variação da rugosidade decorrente do desgaste do flanco secundário decorrente principalmente do desgaste de oxidação, permite a determinação de um critério de fim de vida /85/.
Temperatura de usinagem.	2 	A determinação da temperatura de usinagem pela medição da corrente da termopar ferramenta-peça. O desgaste da ferramenta é determinado empiricamente pelo comportamento da temperatura /86/.
Vibração da ferramenta.	3 	As vibrações da ferramenta são determinadas com analisadores Fourier. É determinado o espectro das amplitudes das vibrações da ferramenta. Aumentos da amplitude para certas frequências aumentam com o aumento da marca de desgaste /87,88/.
Componentes da força de usinagem.	4 	A medição das componentes da força de usinagem ou dos momentos, bem como da potência de acionamento. O aumento das componentes ou do quociente das componentes é correlacionado com o desgaste das ferramentas / 8,16,76,85,86,90,102,116/.

Figura 36: Métodos de medição para a determinação indireta do desgaste durante o torneamento [1].

O processo óptico (processo 1) permite como único processo indireto de medição de desgaste determinar uma grandeza simples de desgaste, seja o desgaste de flanco secundário VB_{NS} pela variação da rugosidade superficial R_t . Este processo só é empregado em nível laboratorial, porque o feixe luminoso praticamente não poderia ser protegido em uma aplicação industrial e a adaptação do microscópio ao diâmetro da peça exige um trabalho considerável. O emprego de fluido de corte, neste caso, não é possível. A instalação na área de trabalho é muito grande e perturba a sequência no decorrer do processo de fabricação [1,42].

Também usado em nível laboratorial para o processo de retificação [44].

Normalmente, na retificação "Center-Less" são feitas grandes exigências dos componentes com relação a construção e qualidade.

Ao lado do monitoramento do procedimento de dressamento é importante um controle 100 % da qualidade da peça, em tempo real. Aqui devem ser verificados tanto a rugosidade R_z medida, bem como os erros superficiais macroscópicos, como marcas e espirais. Em virtude do baixo tempo de contato não podem ser usados sistemas de medição por apalpamento. Para a tarefa é adequado o uso de um sensor óptico de luz difusa, que tem como vantagens a medição imediata e sem contato com a rugosidade e com a estrutura superficial da peça, como pode ser analisado na figura 37.

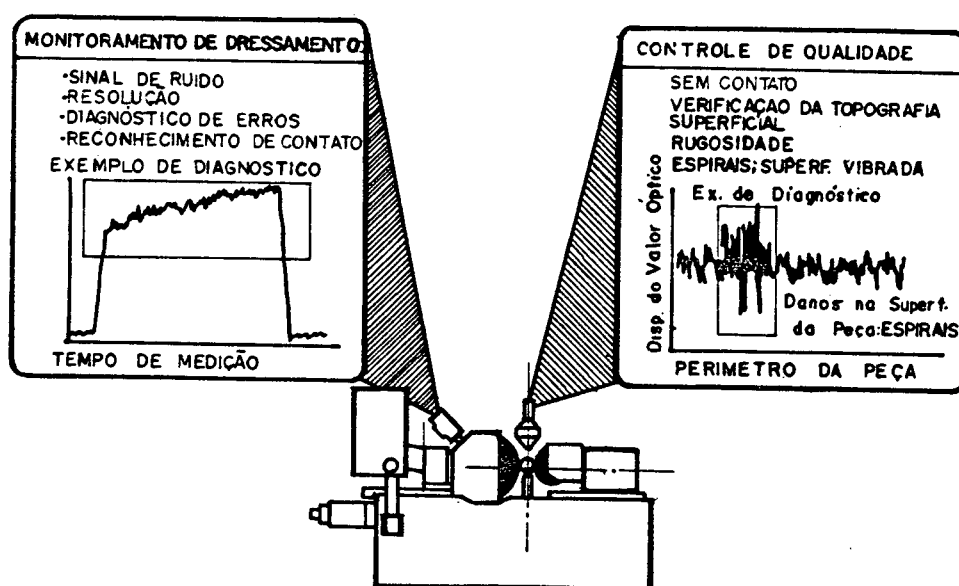


FIGURA 37: Monitoramento do dressamento e controle da qualidade no processo de retificação "Center-Less" [63].

Nos processos de medição 2,3 e 4 - em contrapartida aos processos até agora descritos - os sensores podem ser alojados, de tal forma, que não ocorram perturbações pelo processo de fabricação ou de forma inversa, obedecendo as exigências para a operação de monitoramento.

Para a determinação da tensão térmica na ferramenta (processo 2) se faz necessário uma transmissão de tensão na árvore principal e deve-se garantir um isolamento entre o carro transversal e o suporte da ferramenta. Ambas as exigências podem ser realizadas de forma muito boa na prática. Um cabo de conexão na ferramenta não é necessário. O processo, no entanto, está baseado na condutividade elétrica do material de ferramentas como aço rápido e metais duros não revestidos [1]. Existem, ainda, algumas dificuldades para aplicação do método de medição termopar peça-ferramenta na indústria, isto devido a calibração, muito sensível para a composição da ferramenta de corte e a peça [44,48]. Além disso, os sensores térmicos apresentam uma evolução temporal muito lenta para o reconhecimento em tempo real do desgaste e quebra da ferramenta [64].

A determinação de vibrações na ferramenta através de sensores relativamente baratos (cerâmicas piezelétricas) é relativamente simples (processo 3) [1,2,65].

Além da disposição mostrada na figura 36 para o torneamento, este também é utilizado para o processo de retificação e furação, onde a determinação de vibrações no suporte da ferramenta é possível, com o que não há necessidade de se ter o cabo incômodo na haste da ferramenta. No entanto, quanto mais afastado estiver o sensor de vibrações da região de trabalho, mais as vibrações perturbadoras da máquina ferramenta se tornam sensíveis no sensor. Os sinais de vibração variam com as falhas da ferramenta em alguns níveis de frequência e são largamente usadas no monitoramento da condição da ferramenta. Com o aumento da sofisticação dos sensores e instrumentação usados na medição e análise das vibrações, esta técnica se tornará cada vez mais

prática e de custo efetivo [42,66].

Semelhante aos sensores de vibração, os sensores de emissão acústica são normalmente fixados na haste da ferramenta com imã ou parafuso.

Essa técnica é utilizada a bastante tempo na detecção do desgaste da ferramenta de corte [64].

A figura 38 [4] mostra a construção de um sensor de emissão acústica. O anel piezelétrico de cerâmica é preso por uma mola prato especial, que tem a força constante, mesmo durante a montagem. Experiências com estes sensores mostraram que mesmo aplicando diferentes momentos no parafuso de montagem, não houve influência sobre o valor de relação de ressonância dos sensores [4,65].

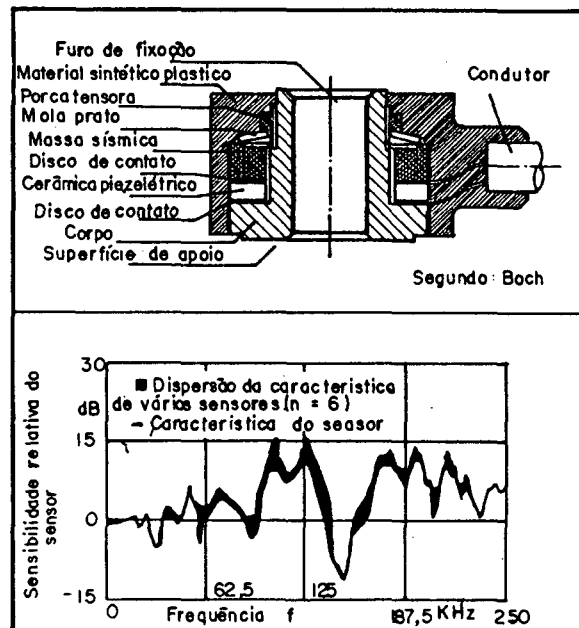


FIGURA 38: Construção e sensibilidade de frequência de um sensor

[4]

Na figura 38 (abaixo) estão as curvas de ressonância de seis sensores montados da mesma forma. Deve-se salientar o comportamento linear dos sensores no âmbito até 15 kHz. Até aproximadamente 90 kHz, os desvios máximos da amplitude são de apenas 8 dB, de maneira que o sensor para monitoramento do ruído, apesar do baixo custo, é totalmente adequado a função.

A extração de sinais de interesse ocorre com sinais de aceleração bastante mais frequentemente do que para sinais de força (figura 39).


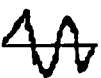
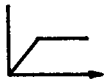


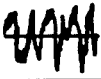

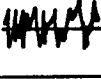

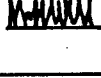

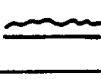


FUNÇÃO	função do TRANSDUTOR	forma do SINAL	ESCLARECIMENTOS
transd.de Vbr.			Sinal acústico do processo de usinagem depende do transdutor de 150 KHz
filtro Passa-alto			Para eliminação de perturbações eletromecânicas
pré-amplificad.			Pré-amplificação e linearização para correção da característica de frequência do sensor
filt.Passo-faixa			Apropriação da faixa de frequência ao processo ou função de monitoramento
retificador			Formação de um valor absoluto
filt.Passo-baixo			Formação de um valor médio
amplif.Final			Apropriação da tensão de saída aos equipamentos de monitoramento

FIGURA 39: Análise do sinal de ruído [65].

Os sinais passam por um filtro passa-alta, para eliminar vibrações elétricas e mecânicas. O amplificador a seguir eleva o sinal dos diversos sensores a um nível único. A linearização pode ser exigida pra compensar aumentos excessivos na ressonância ou rompimento do registro de frequência. Os diversos processos de fabricação e/ou tarefas de monitoramento fazem necessário

observar apenas faixas de frequência interessantes, que podem ser selecionadas com um filtro passa-banda. O próximo passo é a equalização do sinal ganho, que finalmente passam por um filtro passa-baixa, regulado para frequências muito baixas, para obter uma tensão de corrente contínua quase estática. Através deste método, o sinal que originalmente era de alta frequência é transformado em um sinal de baixa frequência, de modo que é obtida uma redução de dados. Com uma transformação A/D posterior, é suficiente uma análise mais curta [4,65].

Apresenta como principais vantagens em relação aos sistemas de medição indireta de força e de torque: baixo custo, montagem simples e alta sensibilidade também para pequenas seções de usinagem.

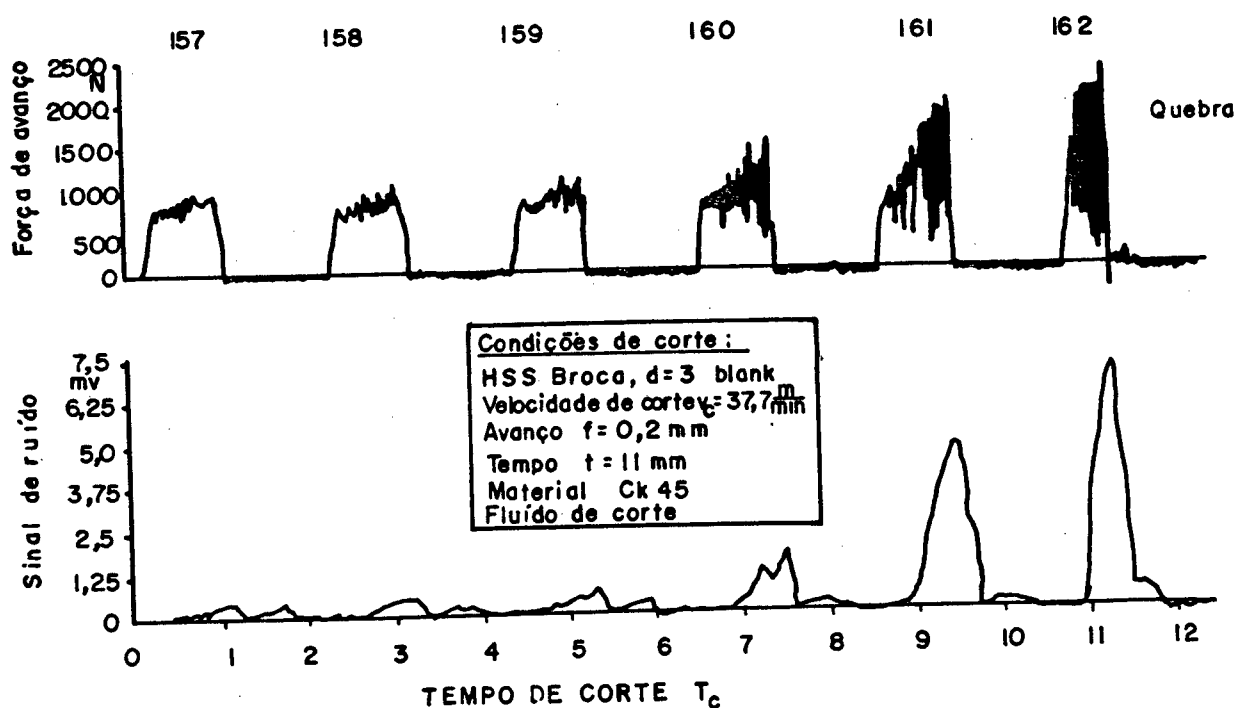


FIGURA 40: Análise comparativa da utilização de um sensor de força com um sensor de ruído no reconhecimento do fim da vida da ferramenta com broca de aço rápido não resvestida [4].

Estes sensores podem ser utilizados para reconhecimento automático de quebra e desgaste de ferramentas no torneamento, furação, retificação e dressamento como, por exemplo, em uma análise comparativa, que pode ser visto na figura 40.

No processo de retificação o sinal acústico é analisado até frequências de 100 kHz. Para captação destes sinais é adequada a localização do sensor nas imediações do cabeçote de retificação.

Para averiguar alterações do sinal típico do processo ao longo da vida da ferramenta, é indispensável uma filtragem alta com várias possibilidades de regulagem. Se for estimada uma modulação da amplitude, têm-se a curva do progresso da escala, que mostra diversas fases do processo de retificação através do tempo de trabalho, conforme figura 41.

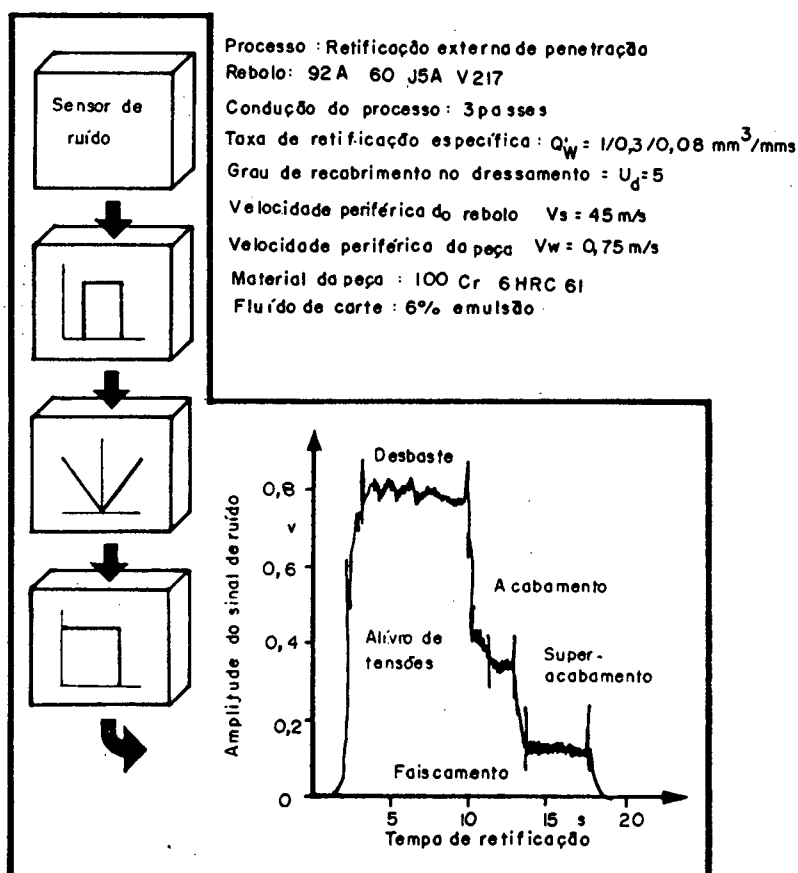
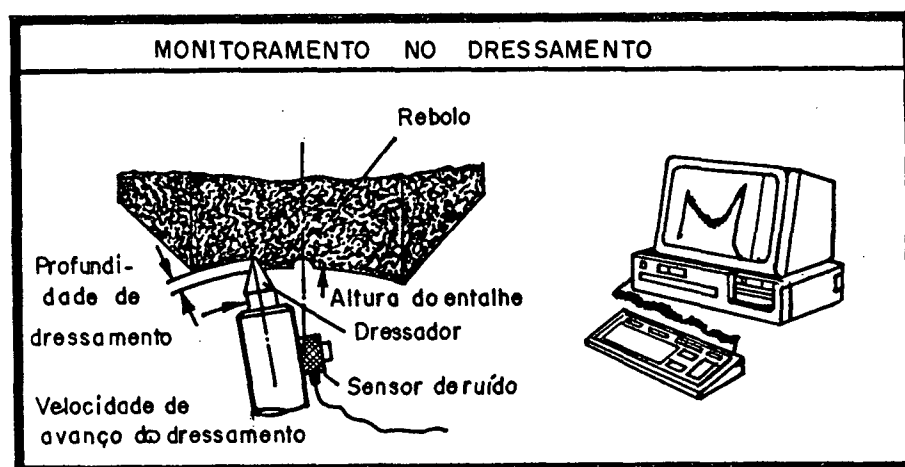


FIGURA 41: Fases do processo de retificação [66].

Um microprocessador identifica o desenvolvimento do sinal das fases de trabalho distintas e calcula grandezas de conhecimento para estas seções do processo, com ajuda dos quais pode-se descrever a vida da ferramenta [66].

O processo de dressamento tem por objetivo gerar a forma e a topografia exigida pelo rebolo para cumprir a tarefa de usinagem respectiva. Variações na posição real do dressamento, desgaste irregular do rebolo ao longo do seu comprimento, fluxo de temperatura dos eixos da máquina entre si ou alterações no perfil da ferramenta de dressar ocasionam erros de dressamento e, devido a isto, variações de qualidade na peça retificada.



APLICAÇÕES	
• Retífica cilíndrica externa longitudinal	• Filiese para dressamento
• Retífica externa cilíndrica de penetração	• Rolo ou filiese para dressamento, touch-dressing
• Retífica plana de perfis de precisões	• Dressam. NC em dois eixos c/ dressad. de ponta única

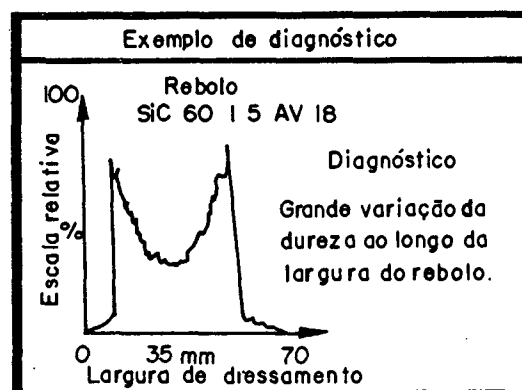


FIGURA 42: Monitoramento do processo de dressamento [67].

Através do tratamento adequado do sinal, é possível verificar a posição real no dressamento e monitorar o dressamento de rebolos convencionais e de nitreto de boro cúbico (CBN), conforme figura 42.

Após um filtro de banda, para eliminação de ruídos parasitas, é construída a curva de sinal do sensor na faixa de alta frequência ($f > 30 \text{ kHz}$). Várias estratégias tornam possível o cálculo do sinal através de um sistema de microprocessamento. Pelo âmbito do "touch-dressing", é possível determinar o ponto de contato entre o rebolo e o dressador com uma incerteza de $1 \mu\text{m}$.

Outra solução para detectar as mudanças nas condições de corte durante a usinagem são as variações na corrente elétrica suprida para motores de avanço e principal ou servos percebidas por um sensor de potência ou corrente [68-69].

A figura 43 mostra o esquema de um torno CNC equipado com um sensor de potência.

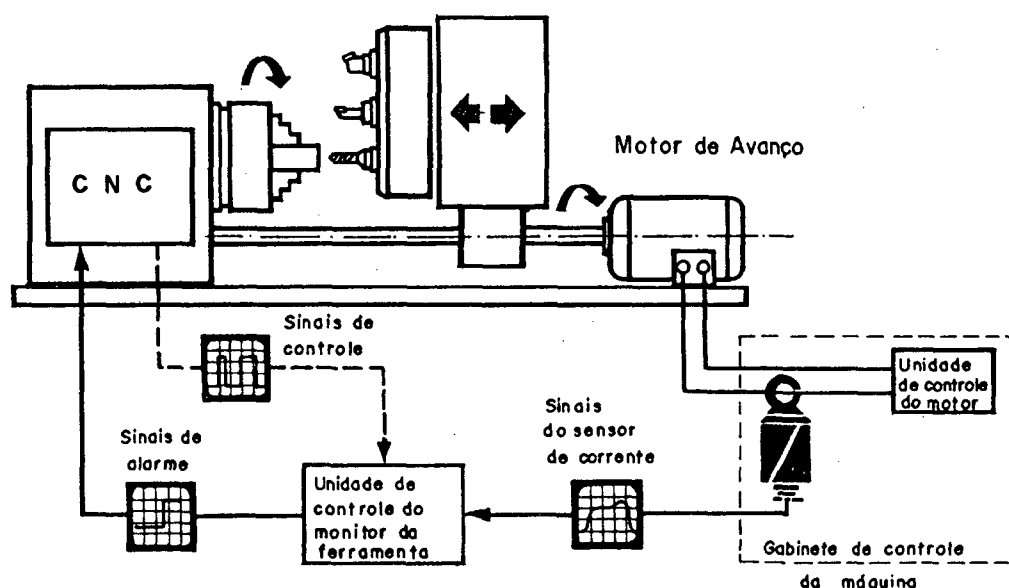


FIGURA 43: Esquema de um torno CNC equipado com um sensor de potência. O condutor de suprimento do motor de avanço do eixo Z é passado através do anel do sensor de potência [69].

Quando a ferramenta está desgastando, uma mudança de potência consumida pelo motor de avanço ocorre. Esta mudança é sentida pelo sensor de corrente que manda ao sistema de monitoramento da ferramenta um sinal proporcional.

Um simples condutor, do cabo de suprimento de potência ao motor de avanço, deve passar pelo anel do sensor de corrente para o monitoramento. Considerada uma forma não complicada dependendo do motivo da aplicação e numa forma muito prática de detecção de variações no processo de torneamento e retificação. Porém, tem maior eficácia quando empregado no processo de furação (na grande maioria das vezes combinado com uma cancela de luz que faz o monitoramento de brocas pequenas). Outra variação é o monitoramento da potência em combinação com uma câmara de linha ou um apalpador de medição em processo, que hoje tem uma aplicação bastante frequente na indústria. É de fácil instalação na máquina ferramenta, pois somente requer um condutor simples do motor ou do servo para o anel do sensor de potência. Baixo custo também para o "retrofitting".

O sensor de corrente é eletricamente isolado do motor ou do servo.

Opera com níveis de corrente entre 0 e 75 A AC ou DC. O tempo de resposta do sensor é de aproximadamente de 0,1 ms para corrente contínua e 25,0 ms para corrente alternada. Sua linearidade é de 1% em um nível de temperatura de 0° a 50°. Na medição da potência, como sensores são utilizados detectores integrados no circuito elétrico. Os sensores de potência abrangem várias faixas de utilização, assim existem sensores para as faixas de 0 a 1,5; 1,5 até 15 e 15 até 150 kW [8]. A saída do valor medido pode ser em kW ou HP. Sua precisão é de 2% do valor

máximo da faixa ou 3% do menor valor medido para tensão contínua e para tensão alternada < 700 Hz ou tensão contínua < 400 Hz (Após 15 min de tempo de operação). A temperatura de operação está na faixa de 0° a 50° [69].

A medição da corrente/potência é problemática nos modernos motores de corrente alternada, pois os sinais elétricos só são interpretáveis com longas filtragens. A resolução não permite que ferramentas pequenas ou de acabamento possam ser monitoradas.

Durante o processo de usinagem, a corrente/potência do motor principal é relacionado com o torque e deste modo com a componente tangencial da força de usinagem (força passiva). Consequentemente, menos potência é consumida quando se utiliza ferramentas novas quando comparado com uma ferramenta desgastada. Essa variação pode ser explorada para o monitoramento on-line do desgaste da ferramenta.

O sensor de potência ou corrente também é utilizado para o monitoramento do desgaste e quebra da ferramenta. É relativamente simples e sua montagem não afetará as operações de usinagem. É menos sensível para o monitoramento do desgaste da ferramenta quando comparado com sensores de força e de vibração. Entretanto, o sistema de medição da corrente foi considerado confiável no monitoramento da quebra da ferramenta em usinagem normal e pesada [42].

Um dos parâmetros que pode ser facilmente medido é a força de usinagem. As forças de usinagem mudam com o desgaste da ferramenta e tem frequentemente sido usadas para a detecção do desgaste e/ou quebra da ferramenta. As forças são muito mais sensíveis do que a medição das vibrações e da potência de usinagem, bem como da emissão acústica.

Para a medição da força de usinagem F e suas componentes (processo 4) da força de avanço F_f , da força passiva F_p , da força de corte F_c , foram desenvolvidos diversos sistemas para medição de força. Esses sistemas foram empregados, de sobremodo, na pesquisa para a determinação de equações de força, bem como para a comprovação dos mecanismos de usinagem e da teoria plasto-mecânica na cunha de corte.

No final dos anos 60 [1] foram desenvolvidos sistemas de medição de força, que em decorrência do princípio de medição piezelétrico permitiram uma grande amplitude da faixa de medição estática e dinâmica, uma grande precisão e linearidade, bem como uma pequena diafonia entre as componentes. Em decorrência destas vantagens em análises laboratoriais, hoje quase que exclusivamente são empregados sistemas de medição piezelétrico. Mais recentemente tem-se referência ao emprego de anéis de medição de força com extensômetros, bem como rolamentos de medição de força. As experiências com estes sistemas novos de medição de força a nível laboratorial podem ser definidos como sendo muito bons, assim como para a aplicação industrial de tais tipos de sistemas não apresentaram maiores problemas.

Analisando-se os processos apresentados com as diferentes grandezas medidas (figuras 35 e 36), então se mostra que o aumento das componentes da força de usinagem é a característica mais adequada para a determinação do fim de vida da ferramenta. Isto está fundamentado pelo fato do aumento da força para um aumento da marca de desgaste, de acordo com referências na literatura pode ser tido como seguro. O know how na área de metrologia é tão grande, que para o futuro a aplicação industrial de sensores de medição de força deve satisfazer as exigências dos

sensores citados.

No monitoramento de ferramentas e de processo em máquinas ferramenta para a remoção de cavacos, o uso de sensores de força tem levado aos melhores resultados. A medição das forças de usinagem atuantes na ferramenta tem duas vantagens chave sobre outros tipos de sensores: as forças são o meio mais sensível de indicação da condição do gume, e também permitem rápida detecção de eventos catastróficos [68]. A condição anormal da ferramenta é detectada examinando o sinal de força para mudança das características as quais incluem colisão, quebra ou desgaste da ferramenta.

Principalmente são empregados os sensores piezelétricos. As cargas eletrostáticas decorrentes da aplicação dos componentes da força de usinagem são transformadas em sinais de tensão por amplificadores de carga adequados e alimentados ao sistema eletrônico de monitoramento.

Os seguintes sensores de força tem-se mostrado capacitados.

A plataforma piezelétrica, figura 44, é constituída de uma chapa de aço com quatro pequenos elementos piezelétricos de uma componente. A posição usual de montagem deste tipo de sensor é entre a base suporte do cabeçote revólver de um torno e o carro transversal, conforme mostrado na figura 45.

Os quatro sensores de pressão ou força axial apresentam uma espessura de 10 a 15 μm maior que a da chapa de aço. A montagem do revólver sobre o carro transversal com a plataforma intermediária leva a uma pré-carga dos elementos de medição. Por um lado, tem-se uma deformação elástica dos anéis piezelétricos e, por outro lado, os anéis deformam as superfícies de montagem do revólver e do carro transversal.

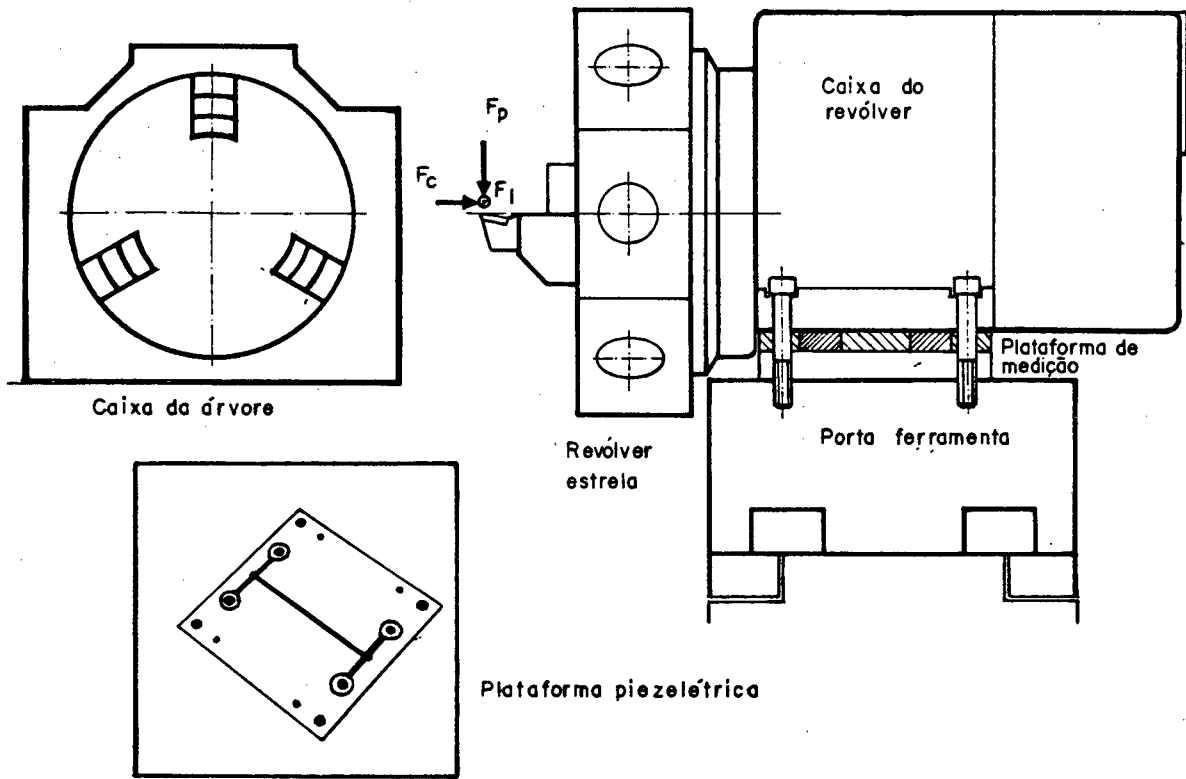


FIGURA 44: Plataforma piezeleétrica para medição de forças [9,72-73].

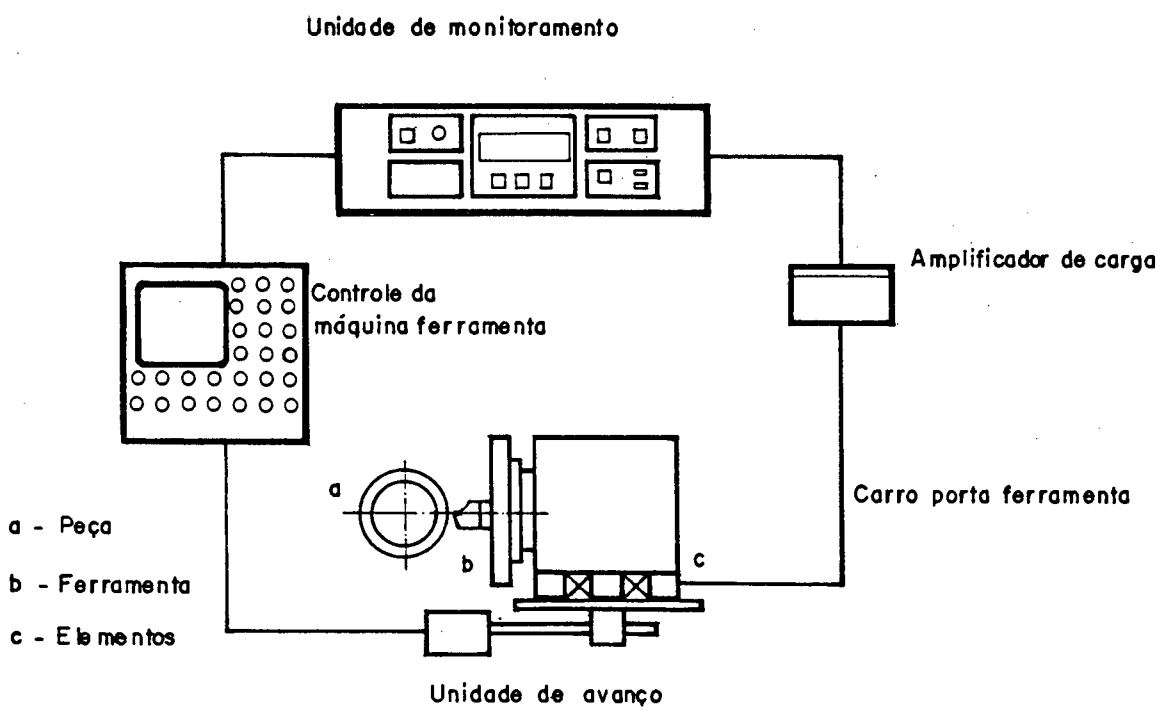


FIGURA 45: Esquema funcional do monitoramento de uma ferramenta em um torno [73].

Não se constata uma diminuição da rigidez da máquina ferramenta decorrente da utilização da plataforma de medição, uma vez que o fluxo de forças passa quase que integralmente pela chapa de aço. Um máximo de 10 % do fluxo de força passa pelos elementos de medição [1,8,9,13,42]. O dimensionamento dos elementos de medição é efetuado de tal forma que uma sobrecarga, mesmo durante uma colisão, seja impossível. O sinal de medição resulta da variação da espessura da chapa de aço pela ação da força sobre a ferramenta de corte.

Apesar da construção muito rígida do sistema, forças da ordem de 10 N já fornecem um sinal nítido mensurável. Na usinagem de aços é possível monitorar a quebra de ferramenta e seu desgaste para seções de usinagem a partir de $0,1 \text{ mm}^2$ [1].

Na instalação posterior da plataforma geralmente se faz necessária a remoção de material em um dos lados vizinhos da montagem. Em regra, para a plataforma necessita-se um espaço de 9 a 12 mm. Assim um "retrofiting" geralmente está associado a um trabalho de usinagem em componentes da máquina ferramenta.

Os anéis de medição (figura 46), são concebidos na mesma forma que as plataformas, e desta forma também resistentes a sobrecargas. Em tornos revólver eles são montados entre o endentamento HIRT fixo e a estrutura suporte do revólver. Em relação à plataforma ele é mais barato por empregar apenas dois elementos de medição. Assim como na plataforma, é possível fixar os anéis de medição com pinos e parafusos.

Na instalação posterior de anéis de medição também se faz necessária a remoção de material em um dos lados vizinhos da montagem. Assim um "retrofiting" está geralmente associado a um trabalho de usinagem em componentes da máquina ferramenta.

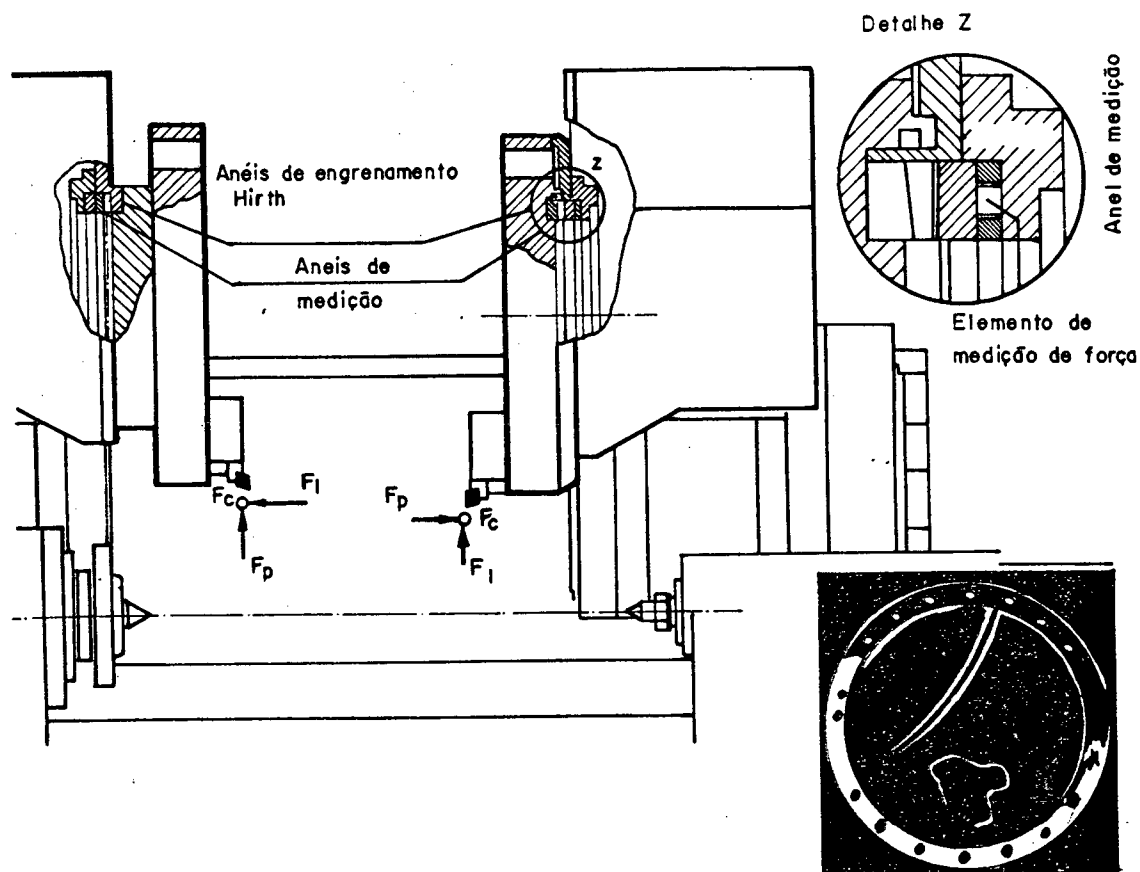


FIGURA 46: Anéis de medição para medição de força em um torno 4 eixos CNC [9,73].

O extensômetro piezelétrico é fixo por um parafuso no lado externo da estrutura do cabeçote revólver, com posição e ângulo de montagem adequados, como mostrado na figura 47. Os pontos de montagem, bem como a orientação angular otimizados, são determinados experimentalmente. Apesar deste trabalho suplementar, esta técnica de aplicação de sensores, que em regra exige dois extensômetros, é a solução mais barata para o monitoramento de ferramentas e de processo.

A bucha de medição piezelétrica é baseada na concepção de buchas de aço para o concreto. Na parte dianteira cônica, que na montagem é expandida contra a parede do furo, encontra-se um

elemento de medição piezelétrico. Pela expansão da bucha durante a montagem, o elemento de medição é pré-tensionado e por isso permite tanto a medição de tensão de tração como a de compressão da estrutura do elemento da máquina ferramenta no qual está montado.

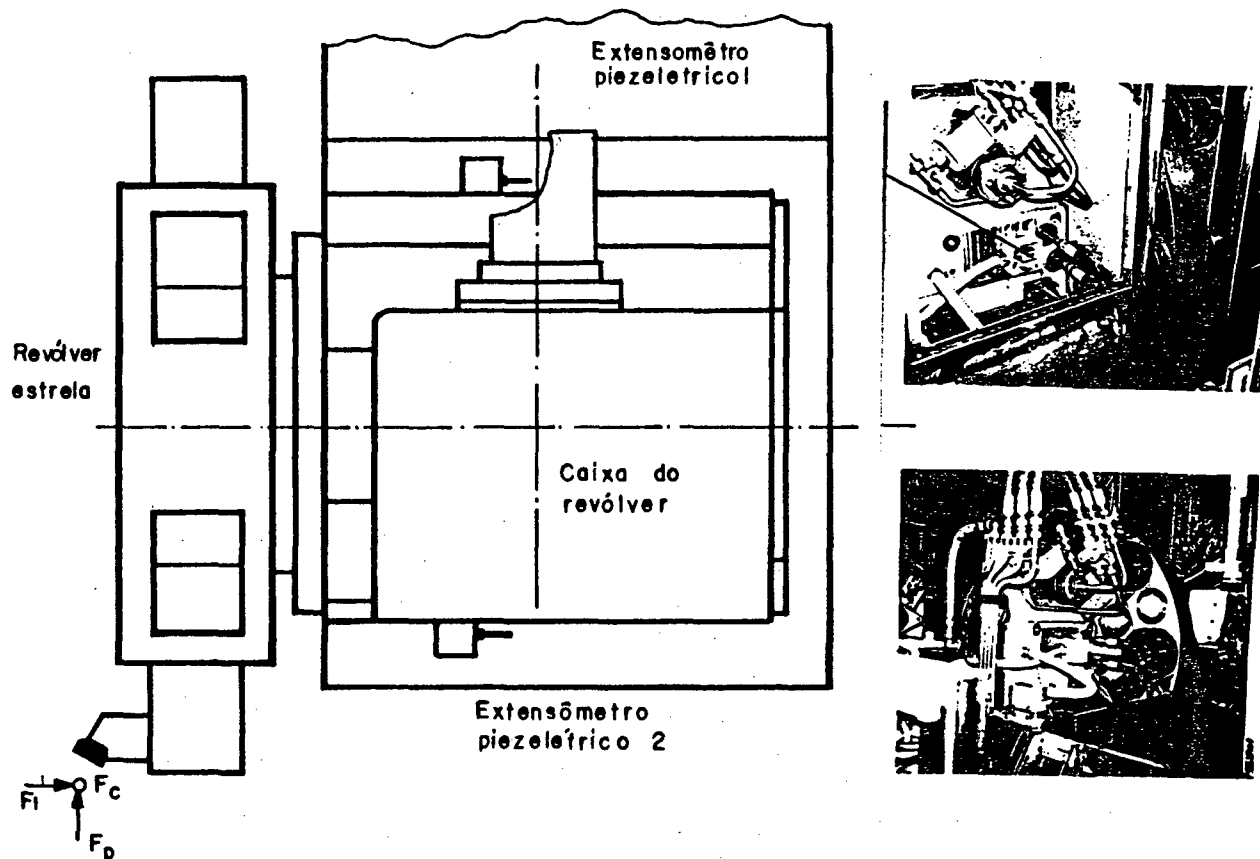


FIGURA 47: Extensômetro piezelétrico para medição de força montado sobre a caixa do revólver [9,72-73].

A bucha de medição, em decorrência do seu embutimento na parede da estrutura da máquina ferramenta no ponto de medição, necessita de bem menos espaço que um extensômetro, ou até mesmo no caso de uma montagem em local rebaixado, não ocupa nenhum espaço extra.

A figura 48 mostra as variações de montagem de buchas de medição piezelétrica.

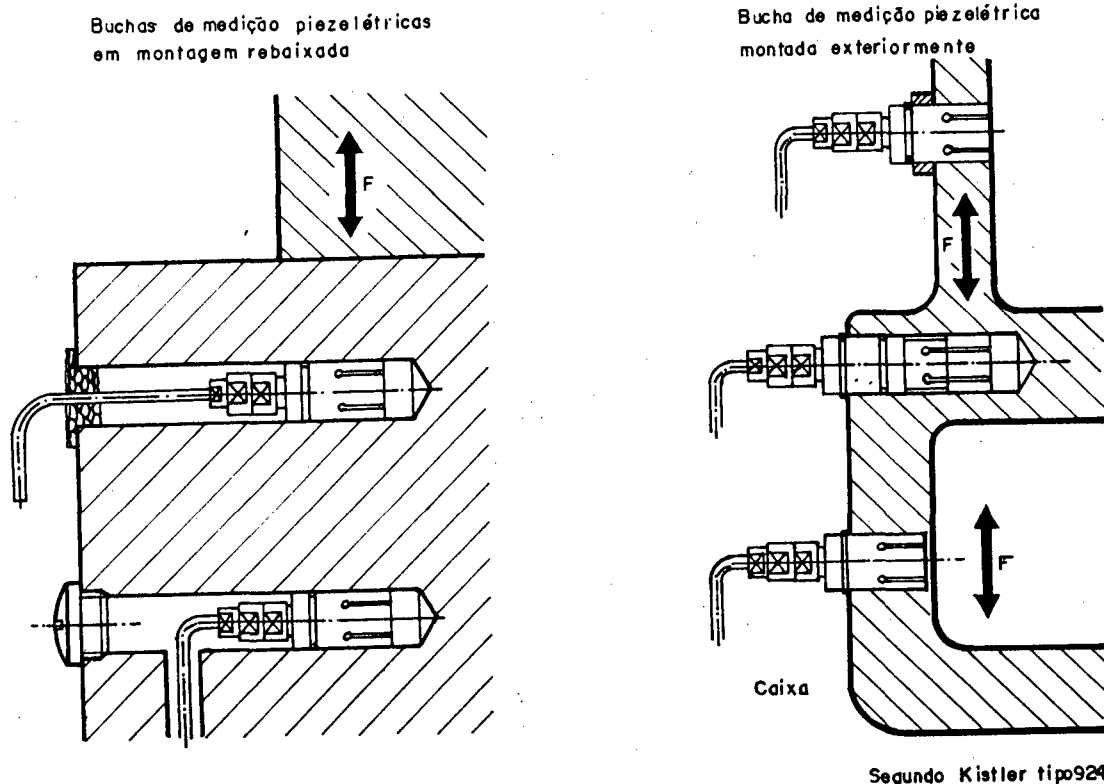


FIGURA 48: Variações de montagem de buchas de medição piezelétrica [9,72-73].

Além disso, a bucha de medição apresenta uma maior sensibilidade, com o que a seção de usinagem mínima monitorável é menor do que a do extensômetro.

O " retrofiting " com buchas de medição ou com extensômetro, por sua vez, é bem mais simples. No entanto, estes apenas permitem um monitoramento para seções de usinagem maiores, em regra a partir de $0,3$ a $1,0 \text{ mm}^2$ [09].

O sensor de força de avanço pode ser montado na maioria das máquinas ferramenta. Para tal, dependendo do tipo de aplicação, podem ser usados a árvore principal da máquina ferramenta, bem como o fuso de avanço. O sensor de força de avanço, no entanto, também pode ser montado em árvores não rotativas - como, por

exemplo, em varas de avanço (figura 49) ou em dispositivos rotativos de fixação de ferramenta.

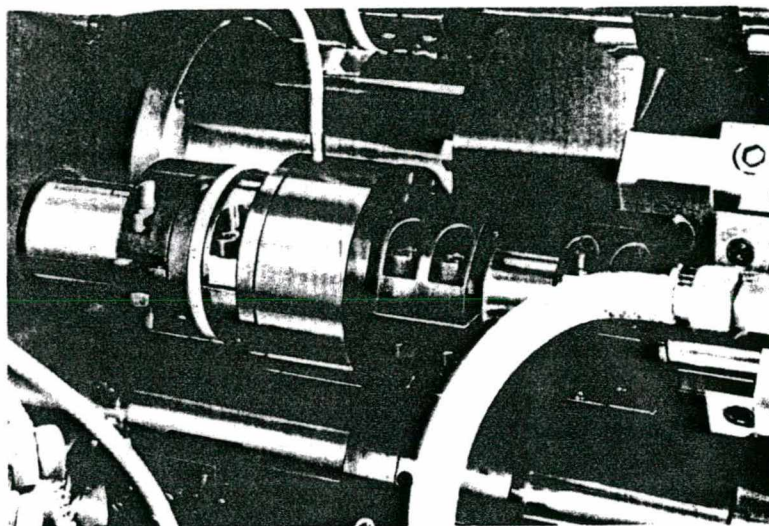


FIGURA 49: Sensor de avanço instalado em árvore não rotativa [71].

As características do sensor são:

- alta sensibilidade. Permite a medição de até 1 % da força nominal;
- pequeno tempo de resposta;
- comportamento linear de transmissão. Erro de linearidade de forma geral menor que ± 1 ;
- nenhuma histerese; e
- medição no sentido positivo e negativo.

Na usinagem de metais, com a progressão do desgaste do gume da ferramenta aumentam as componentes da força de usinagem. Nisto a componente axial (força passiva) permite a melhor análise sobre as características do gume da ferramenta. A ação da força passa pela árvore, rolamentos e sensor para a estrutura da máquina ferramenta. Esta variação da força axial é detectada diretamente pelo sensor de força.

O sensor transforma a força axial em um sinal elétrico correspondente que é transmitido para a unidade de tratamento de sinais.

O sensor é montado em uma bucha intermediária entre o mancal axial e a estrutura da máquina ferramenta.

No caso da montagem do sensor na árvore principal ou no fuso de avanço, o sensor permite a medição e o monitoramento direto da força passiva. Em decorrência do pequeno percurso da força tem-se reações muito rápidas.

O sensor compreende dois anéis concêntricos que estão montados em uma estrutura precisa que serve como carcaça para a árvore rotativa, conforme é mostrado na figura 50.

O perfil do anel interno apresenta uma forma especial e apresenta duas regiões sensíveis, sobre a qual estão colados extensômetros para a determinação das forças de uma forma simétrica. Os extensômetros formam uma ponte de Wheatstone completa.

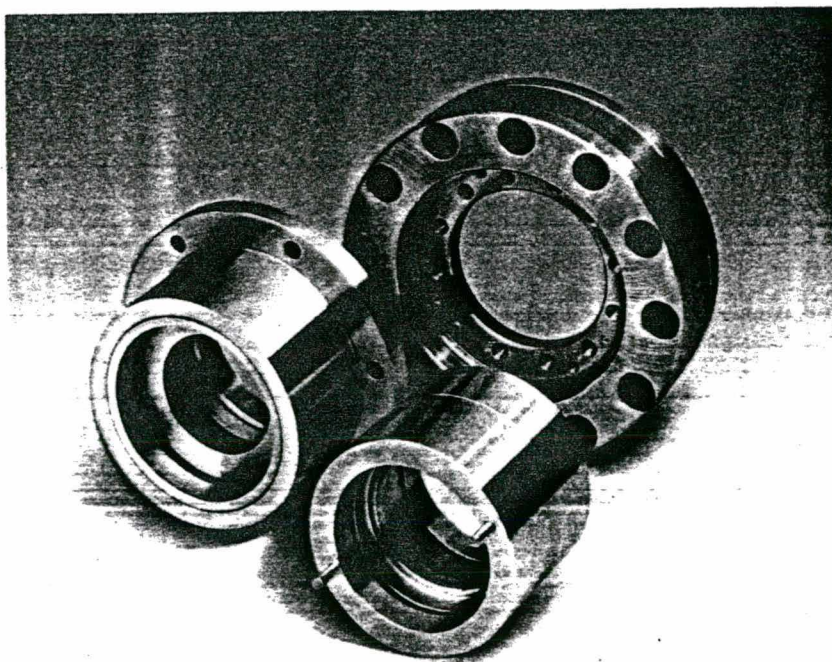


FIGURA 50: Tipos de sensores de avanço [71].

Através da estruturação adequada do sensor pode-se garantir que a compensação da temperatura e variações na protensão do mancal rotativo não influenciam o sinal do sensor.

O anel externo é lacrado herméticamente com o anel interno para que os sensores estejam completamente protegidos da ação de pó, fluido de corte e lubrificante.

As deformações nos elementos da máquina decorrentes do momento torçor do motor (medidas no diâmetro - perímetro) estão na faixa de 0,1 a 1 mm. Uma quebra da ferramenta leva a alterações muito rápidas na força de corte. Ondas de choque se propagam de maneira que alterações na carga são sentidas na região de medição em questão de milisegundos.

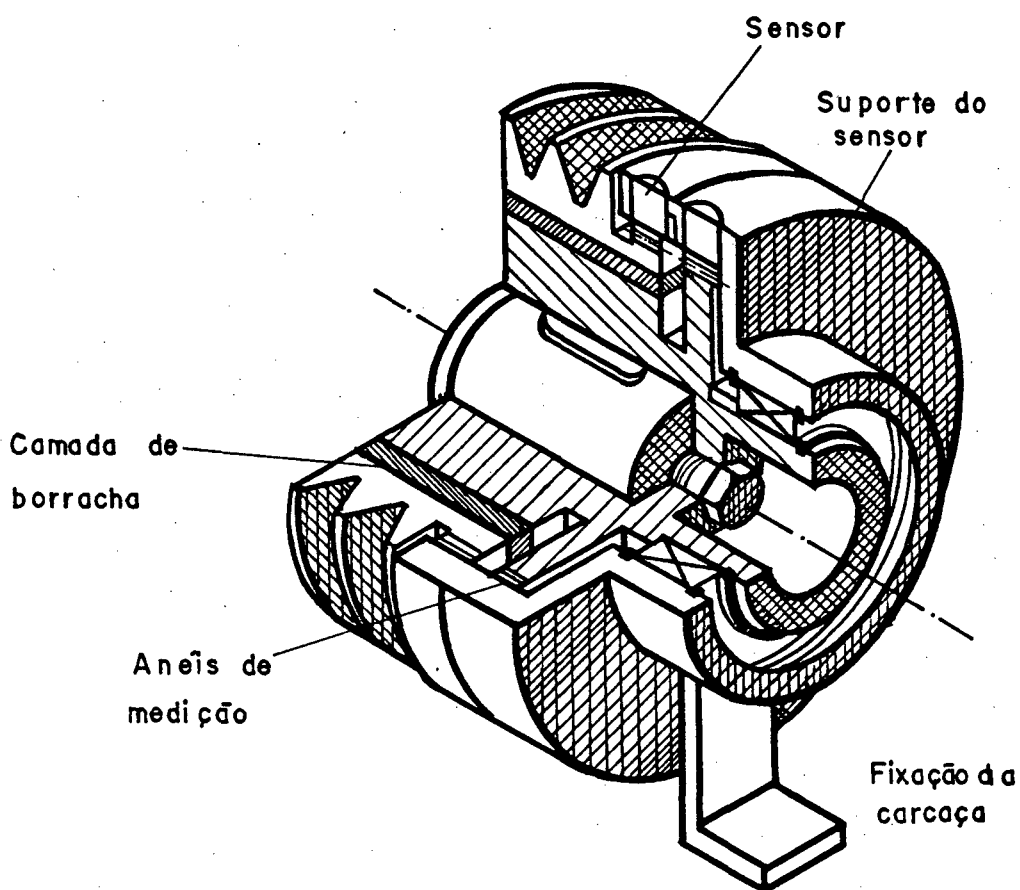


FIGURA 51: Corte transversal de um sensor indutivo magnético [02].

O elemento de medição (figura 51) consta de uma polia cuja parte central é acoplada a parte externa através de uma camada de borracha. A parte central e a parte externa da polia suportam um anel de medição, no qual está embutido um suporte para o sensor.

Na torção do elemento de medição o campo magnético de um sensor constituído de um ímã permanente é modificado. Os sensores em decorrência disto fornecem um sinal com variação senoidal. A formação do sinal é efetuada sem contato nos sensores.

Para uma solicitação suplementar do elemento de medição, como a que ocorre por uma variação dos esforços, teremos uma variação das fases nos sensores que levam à variação de um sinal de medição. A ordem de grandeza deste deslocamento de fase é uma medida para os momentos e a força de corte durante a usinagem.

Se a ferramenta desgasta, a força de corte varia e em decorrência tem-se um aumento do deslocamento das fases.

O sistema de medição é dimensionado de tal forma que para todas as máquinas ferramenta e sistemas de transmissão (acoplamento elástico, correias dentadas, correias em V, correias planas ou correias poli-V), independente da potência utilizada, o elemento de medição apresente uma distorção de aproximadamente 1° para o torque máximo.

Nos casos do acoplamento elástico, as duas rodas de medição são montadas sobre as metades justapostas do acoplamento. Os sensores são montados de forma análoga a solução descrita anteriormente.

Porém, nos casos onde o acoplamento rígido do motor e de entrada da caixa da engrenagem ou árvore não permitir o uso dos elementos indicados, não se terá aplicação efetiva do sensor indutivo magnético.

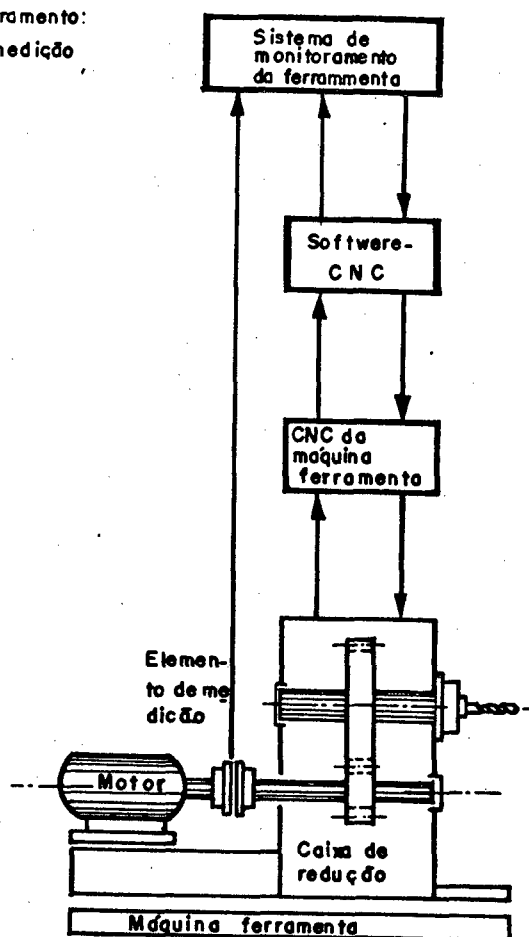
Na figura pode ser observado o princípio de funcionamento de um sistema de monitoramento que utiliza este tipo de sensor.

Peças do sistema

Unidade de monitoramento:
Equipamento de medição
e controle

Software
da máquina
ampliada

Elemento
de medição
e sensores



Funções:

Recepção e tratamento de sinais
armazenamento de valores de
medição limite, indicação de
erros.

Indicação dos tempos de medição,
ampliação do software existente
para as exigências especiais do
ToolControl, transformações das
informações de erro em sinais
de comando.

Determinação da força principal
pelo medição do ângulo de torção
de um elemento de transmissão
de força e informações para o sis-
tema de monitoramento.

(Desgaste e quebra levam a um
aumento da força principal de
corte e com isso no momento torçor
que leva a uma torção suplementar
do elemento de transmissão de força

FIGURA 52: Princípio de funcionamento de um sistema de monitoramento que utiliza o sensor indutivo magnético [75].

5.1.3 Sistemas Multi-Sensores.

Os mono-sensores têm sido empregados em sistemas comerciais de monitoramento. Com bastante sucesso, estes conseguem intervir no controle da máquina-ferramenta provocando a parada do processo em casos de catástrofe.

O enfoque de multi-sensores é análogo aos métodos que um ser humano usa para monitorar um processo de manufatura. O enfoque do ser humano é caracterizado por uma falta de sensores e de modelos de processos precisos; entretanto, o ser humano considera numerosos sensores diferentes (seus próprios sentidos) e processa informações sobre uma variedade de variáveis de processo, como temperatura e força.

Analogamente, pode-se considerar um sistema para monitorar processos de manufatura pelo qual a medida das variáveis é executada por vários dispositivos transmissores, que alimentam seus sinais para diferentes modelos de processo. Os modelos de processo, por sua vez, contêm expressões matemáticas baseadas na física do processo; eles correlacionam as variáveis medidas com as variáveis de estado de processo, são as que não podem ser medidas diretamente [43,46,64,76-83].

A percepção global das diferentes variáveis medidas como, por exemplo, condições de usinagem flexíveis, troca de velocidades, materiais das peças, materiais das ferramentas, formas e as incertezas inerentes ao processo, podem oferecer uma estimativa mais segura e precisa do sistema automatizado [43].

Em geral, dois enfoques básicos podem ser considerados para sintetizar a informação do sensor. O primeiro enfoque requer treinamento, e o segundo, não.

Na primeira abordagem, a síntese ocorre através de um "mecanismo" que primeiro "aprende", numa fase de treinamento, como a síntese deve ocorrer. Métodos deste tipo incluem regressão pelos mínimos quadrados, o método de grupo para processamento de dados e redes neurais [43,46,64,77-84].

A segunda abordagem focaliza a síntese de informação do

sensor de maneira diferente: Os critérios estatísticos são usados para determinar estimativas fornecidas pelos modelos de processo. Para usar este enfoque, deve-se ter disponível a informação estatística sobre a correlação entre as variáveis de estado e suas estimativas dadas pelos modelos de processo [76].

Se esta informação estatística puder ser obtida sem experiências especiais, o enfoque estatístico para a síntese do sensor teria uma vantagem sobre os métodos que requerem dados de treinamento [76].

5.1.4 Sensores Inteligentes

Segundo Laurieri Sistema Inteligente é um programa computacional que usa algoritmos, conhecimento e deduções para solucionar problemas: aqueles que requerem experiência humana para solucioná-los.

Sistema Inteligente é um programa computacional que usa conhecimento integral, estratégias de controle e domínio para solucionar problemas que requerem experiência humana [10, 79].

Sensores inteligentes também realizam o processamento e condicionamento do sinal [85-86].

A diferença primária entre uma estação de usinagem automatizada é que o sistema inteligente é capaz de tomar decisões baseadas na informação significativa acerca do estado do sistema. Controle inteligente do processo de usinagem pode, em geral, ser tratado como uma tomada de decisão do problema. Muitas das decisões tomadas por um controlador inteligente devem ser feitas dentro de um período de tempo muito curto. Uma resposta adequada para mudanças das condições do sistema e eventos tais

como o desgaste da ferramenta, quebra da máquina e outras perturbações devem se feitas dentro de segundos ou milisegundos com o objetivo de garantir a segurança e a confiabilidade do processo. A execução de uma tomada de decisão de um processo pode ser formulada de uma maneira similar ao que o homem começaria a proceder. A decisão executada pode ser conceituada como consistindo de quatro passos subsequentes:

No primeiro passo, seleção das alternativas num ponto de decisão dado.

No segundo passo, seleção do critério de aplicação para evolução das diferentes alternativas.

No terceiro passo, cálculo ou estimativa dos parâmetros de seleção para cada alternativa proposta várias vezes.

No quarto passo, através da aplicação da regra de decisão: Selecionar a melhor alternativa.

Esse método de tomada de decisão pode ser conscientemente expresso num formato de matriz de decisão, onde o elemento matricial indica a evolução de cada alternativa com respeito ao critério. Esse método descreve uma estrutura na qual a técnica AI (artificial intelligence) [87-89] pode operar em conjunto com os conceitos operacionais pesquisados. Esta aproximação permite o uso da investigação qualitativa tão bem quanto a quantitativa num processo de tomada de decisão. Ainda as decisões podem ser executadas dentro de um tempo de reação requisitado pelo sistema de controle de uma operação de usinagem. Adicionalmente, a aproximação é expressa em termos gerais e pode ser usado para modelo e controle de qualquer estação de trabalho.

A figura 53 ilustra a estrutura de um controlador inteligente de usinagem. O núcleo de um sistema é a matriz de

decisão, as colunas representam os diferentes critérios que devem ser considerados, e as linhas as diferentes alternativas que podem ser consideradas. Os elementos matriciais são os diferentes valores de critério que se deve ter para cada alternativa a ser considerada.

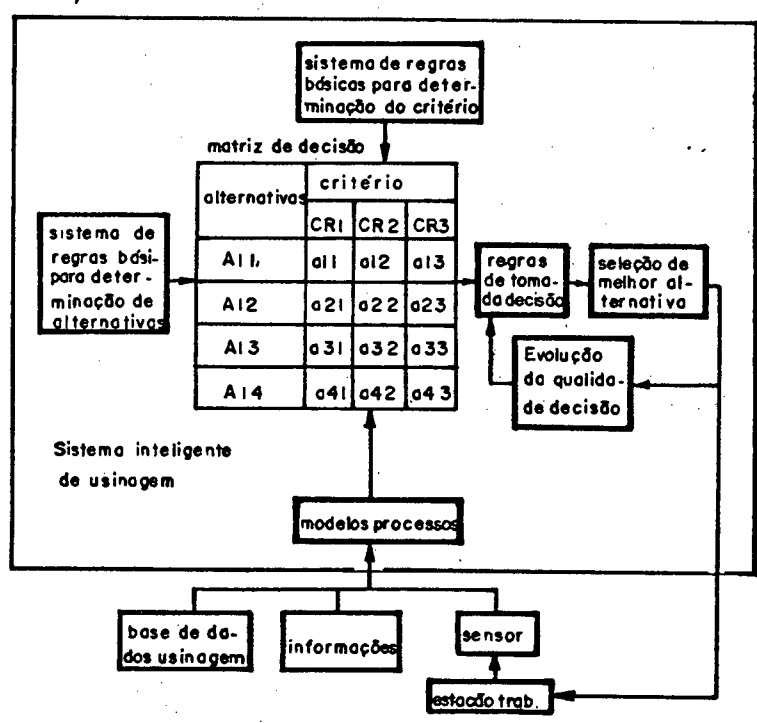


FIGURA 53: Estrutura básica de um sistema inteligente de Usinagem [6].

O sistema consiste de um número de elementos significativos que podem ser descritos como segue:

- Um sistema de regras básicas para a seleção do critério procede da conexão entre a operação de usinagem e os objetivos que são regulados no nível mais alto da hierarquia de usinagem. A seleção de módulos do critério que tem que ser considerado durante o processo de usinagem.

- Um sistema de regras básicas para a solução de produtos alternativos da matriz de decisão contém um conjunto de

características das quais a melhor alternativa tem que ser selecionada. Em geral, as alternativas representam um conjunto dos parâmetros de entrada do processo.

- Os modelos de processo, baseados na informação do sensor tão bem quanto a informação da peça e a informação de um banco de dados geral de usinagem, produz uma matriz de decisão com valores de alternativas com respeito a diferentes critérios.

- Um conjunto de tomada de decisões é aplicado para a matriz de decisão para selecionar a melhor alternativa. O elemento da estrutura em conjunto com um sub-módulo para evolução da qualidade de decisão, seleciona a melhor decisão quando uma decisão deve ser tomada.

Usando essa aproximação, a decisão deverá ser tomada rapidamente e dentro de um tempo planejado requisitado por uma estação de usinagem inteligente. A figura 54 ilustra a estrutura desse módulo em maiores detalhes.

Nesse exemplo, vários sensores são usados para os sistemas de tomada de decisão para a conexão do processo de usinagem:

- Sensores de força que sensoram a força de corte ao longo de três eixos coordenados.

- Sensores de temperatura que sensoram a temperatura da ferramenta tão preciso quanto possível.

- Sensores de vibração que sensoram algum tipo de vibração (isto é, emissão acústica, etc.) relacionado com o processo de usinagem.

Os sensores alimentarão os seus sinais em três modelos independentes do processo que processam os sinais, procedendo os valores de uma matriz inicial de decisão na figura 54, os valores são descritos como a_{ijk} , onde i denota o sensor do qual o valor

foi gerado, j refere-se a alternativa a ser considerada e k refere-se ao critério. A figura 54 dá um exemplo de dois critérios, critério 1 e critério 2 que devem ser considerados.

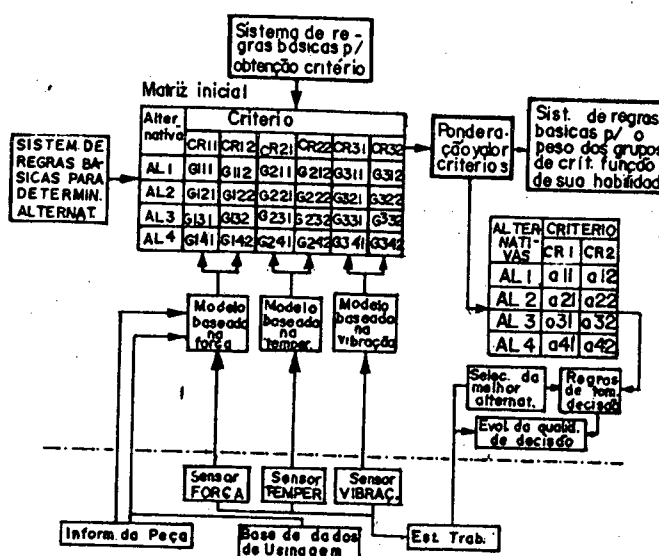


FIGURA 54: Exemplo de um sistema inteligente de usinagem [6].

A matriz inicial contém valores para diferentes critérios que são independentemente gerados por três modelos independentes de processo. A matriz final de decisão é determinada por um pequeno sistema de regra-básica que estabelece o peso dos fatores baseado em informações de uma operação de usinagem particular para ser controlado tão bem quanto a confiabilidade dos três sensores. Após a evolução preliminar da matriz inicial de decisão, uma matriz final de decisão é construída. As alternativas da matriz final de decisão devem ser variações do avanço dado como um porcentagem do avanço programado inicialmente. Os critérios são os custos e os tempos requisitados da operação contínua de usinagem para cada alternativa correspondente. Após a construção de cada matriz de decisão, o

próximo passo é a seleção do melhor avanço par aplicação de um conjunto de regras de tomada de decisão. A concepção, como apresentada acima, para o controle do processo de usinagem fornece um número de vantagens significativas sobre a técnica de controle adaptativo e/ou aproximações de um sistema inteligente:

- O tempo requisitado para tomada de decisão tem sido substancialmente reduzido pela construção de sistemas de pequenos módulos de dimensão racionalizada e, como será discutido adicionalmente na próxima seção, procedendo de dois níveis de decisão.

Decisões rápidas para a segurança e proteção da máquina ferramenta, e mais decisões extensivas para a escolha ótima da seleção de alternativas.

- Desde que o número de modelos de processo independentemente estabilizados podem ser usados, o resultado de qualquer mudança nos parâmetros do processo será simulado precisamente por um novo controlador inteligente do que as técnicas convencionais baseadas num simples processamento do sensor.

- Por causa da estrutura modular e da maneira genérica da formulação do modelo do processo, o controlador inteligente é mais flexível. Uma grande variedade de condições da ferramenta, materiais e geometria podem facilmente ser incluídas dentro de uma estrutura geral do controlador descrito.

- Finalmente, pela utilização de uma variedade de sensores, um volume máximo de informações é considerado num controle de tomada de decisão, a qualidade das decisões é conseqüentemente igualmente melhor do que as decisões baseadas na informação de um simples sensor.

5.2 Condicionamento do Sinal

Os sinais oriundos dos sensores podem captar informações que não são relevantes para a análise da grandeza que está sendo monitorada. Consequentemente deve ser feita uma condensação de informações e a extração de dados de interesse. Para tal os sinais podem ser filtrados por filtro passa alto, passa baixo ou passa banda, geralmente são amplificados, convertidos A/D e selecionados de acordo com a necessidade. Em algumas situações tem-se a análise no domínio do tempo, da frequência ou ainda por análise cepstrum.

A análise cepstrum é um método para a deconvolução do sinal.

5.3 Estratégias

5.3.1 Sistemas de Controle Adaptativo

Os sistemas de controle adaptativo que são sistemas de realimentação fechados podem ajustar automaticamente as condições de usinagem de acordo com a estratégia do programa dado. Os sistemas mais simples ativam a parada da máquina-ferramenta ou a parada de avanço no caso de perturbações. Controles mais sofisticados são os sistemas de controle adaptativo limite e sistema de controle adaptativo otimizado - ACC e ACO. Os sistemas ACC garantem que um nível de remoção de material é mantido no armazenamento máximo que os limites dados de força, torque ou temperatura não são excedidos. Os sistemas ACO podem otimizar as condições de usinagem com respeito a função programada alvo, isto é, por exemplo, usinagem com mínimos custos.

5.3.2 Sistemas de Diagnose

Os sistemas de diagnose monitoram e tentam encontrar uma relação casual ou funcional entre perturbações na máquina e suas origens. Sistemas de diagnose são sistemas de realimentação abertos.

5.3.3 Sistemas de Monitoramento

Os sistemas de monitoramento medem as condições da máquina-ferramenta ou de seu próprio processo. No caso de uma perturbação, esta é indicada num display ou ativando um alarme esperando pela intervenção de um operador. Os sistemas de monitoramento também são sistemas de realimentação abertos.

5.4 Modelos

Os modelos são requisitados para relatar os valores medidos para o monitoramento e controle, isto é, o sinal de força de avanço é relatado para o estado de desgaste da ferramenta com a condição de prevenir a falha da ferramenta. Os modelos podem ser embasados fisicamente ou empiricamente. Um modelo tem que ser desenvolvido com ajuda de equações matemáticas e requerem dados de entrada.

Outro fator importante é a existência de limites suplementares para o reconhecimento rápido de colisão em máquinas ferramentas. Com isso é possível reduzir custos resultantes de colisões a um valor mínimo. Pesquisa realizada na "Universidade Técnica de Munique" mostrou que anualmente o valor decorrente de

colisão é da ordem de DM 25.000.00 [9]. Esses custos podem ser reduzidos ou eliminados completamente devido ao emprego de sistemas de monitoramento.

Os Modelos de monitoramento podem ser apresentados de duas formas:

- Monitoramento com Limites Estáticos, e
- Monitoramento com Limites Dinâmicos.

O monitoramento com limites estáticos pode-se realizar através de duas técnicas denominadas de "Teach-In" e de reconhecimento de padrões, ou seja, de acordo com um padrão armazenado na unidade de processamento.

O monitoramento com limites dinâmicos só é realizado com a técnica "Teach-In".

Grandes variações de sinal decorrentes de variações da sobremedida ou da dureza das peças, que podem levar a quebra da ferramenta ou uma variação da marca de desgaste também podem levar a valores superiores a este limite estático. Desta forma, a utilização de limites estáticos só pode ser aplicada com sucesso para peças fabricadas a partir de barras trefiladas ou pré-usinadas, peças extrudadas, bem como na furação [8,9].

A sensibilidade do sistema é variada aumentando-se ou diminuindo-se os níveis de alarme relativos a linha base da grandeza determinada.

5.4.1 Monitoramento com Limites Estáticos

5.4.1.1 Técnica "Teach-In"

Esta técnica baseia-se na medição do sinal oriundo do sensor

junto a primeira peça de uma série, na qualidade de processamento momentâneo dos valores de referência armazenados. Estes farão a ligação interna no sentido da grandeza medida de uma largura de banda com o processo de aquisição comparado e analisado. Este modelo da grandeza fornece uma referência durante o processo normal, onde o ciclo de Teach-In é realizado com ferramenta nova e o valor apreendido é estabelecido como sendo 100 %. Níveis limites podem ser fixados como uma porcentagem de valores fixos sobre e/ou abaixo da linha base que foi estabelecida durante a fase de Teach-In.

Este modelo é mais empregado para a aplicação em sistemas de monitoramento.

Muitos tipos de sistemas trabalham com a detecção do desgaste, quebra ou falta da ferramenta e, ainda, a colisão da máquina-ferramenta ou da peça.

A utilização comercial desses sistemas é realizada por diversos fabricantes [2,69,71-72,75,90-114].

O sistema que atua de acordo com este modelo pode realizar monitoramento no processo de usinagem de torneamento, furação e fresamento com até 4 limites estáticos (limites 1 a 4, figura 55). Os dados de monitoramento são sincronizados através de uma interface CLP. Assim, para cada ciclo de usinagem, eventualmente para cada frase NC, são determinados limites adequados. Neste assim denominado ciclo, o monitor de processo é informado através do sistema TEACH-IN na usinagem da primeira peça para valores 100% do sinal da força correspondente [9,72].

Os limites de 1 a 4 reagem para a ultrapassagem superior do sinal flutuante e para os tempos de reação dispõem-se de tabelas de recomendação e os valores podem ser modificadas através do

teclado do sistema.

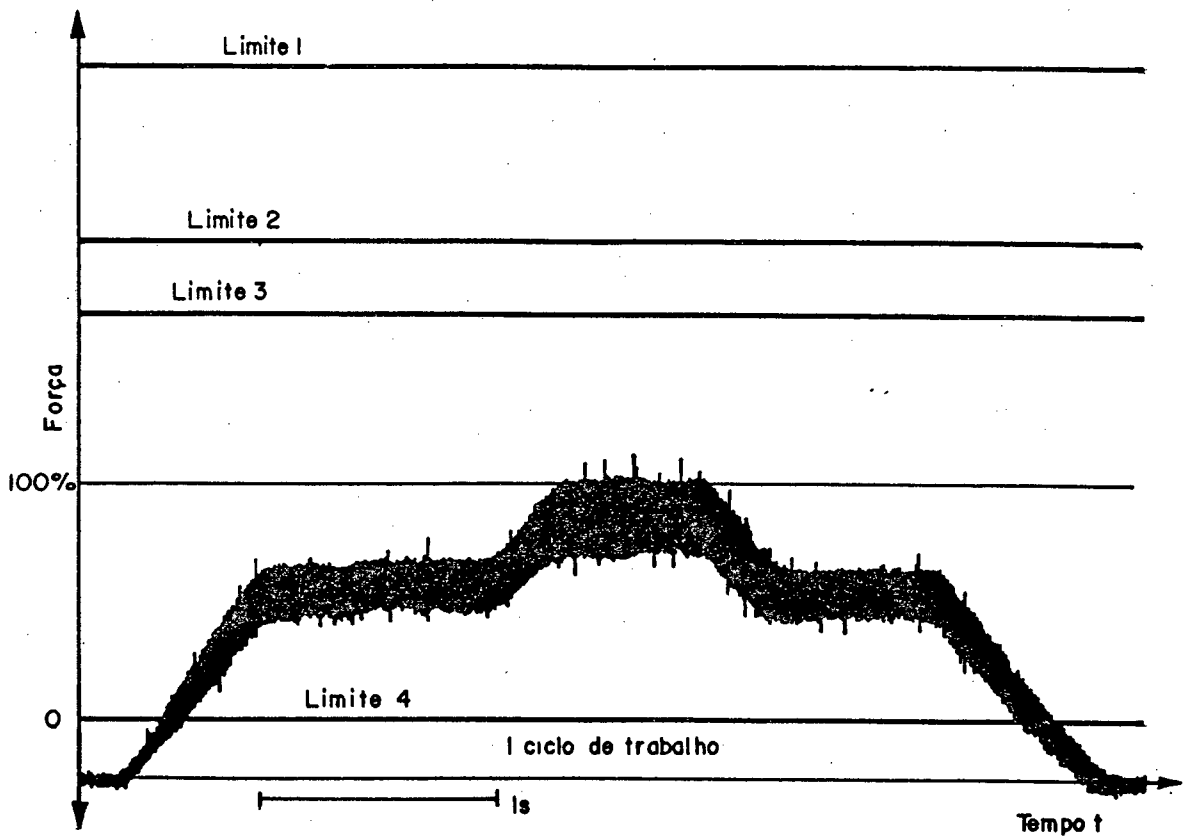


FIGURA 55: Posição dos limites em um ciclo de trabalho no sistema de monitoramento de processo [9,72].

O reconhecimento da colisão de ferramentas se dá pela ultrapassagem do limite 1. O limite logo abaixo, limite 2, serve para um reconhecimento rápido de uma quebra de ferramenta ou outras flutuações do processo para tempos de reação da ordem de 5 ms. Entre o limite 2 e o pico 100 % é colocado o limite 3, para o reconhecimento de desgaste e que reage apenas para tempos de reação da ordem de 50 a 200 ms.

O limite 4 está situado abaixo do pico 100 % e serve para reconhecer o corte em vazio e eventualmente para o caso de ferramentas completamente quebradas, ou ainda a falta da peça na máquina-ferramenta.

A figura 56 mostra, mediante um exemplo, o reconhecimento da quebra de uma ferramenta através do limite 2, bem como o reconhecimento do desgaste da ferramenta pelo limite 3. Como pode-se deduzir do comportamento do sinal, o impulso da força no momento da quebra não é reconhecível, já que os limites de reconhecimento reagem de forma muito lenta.

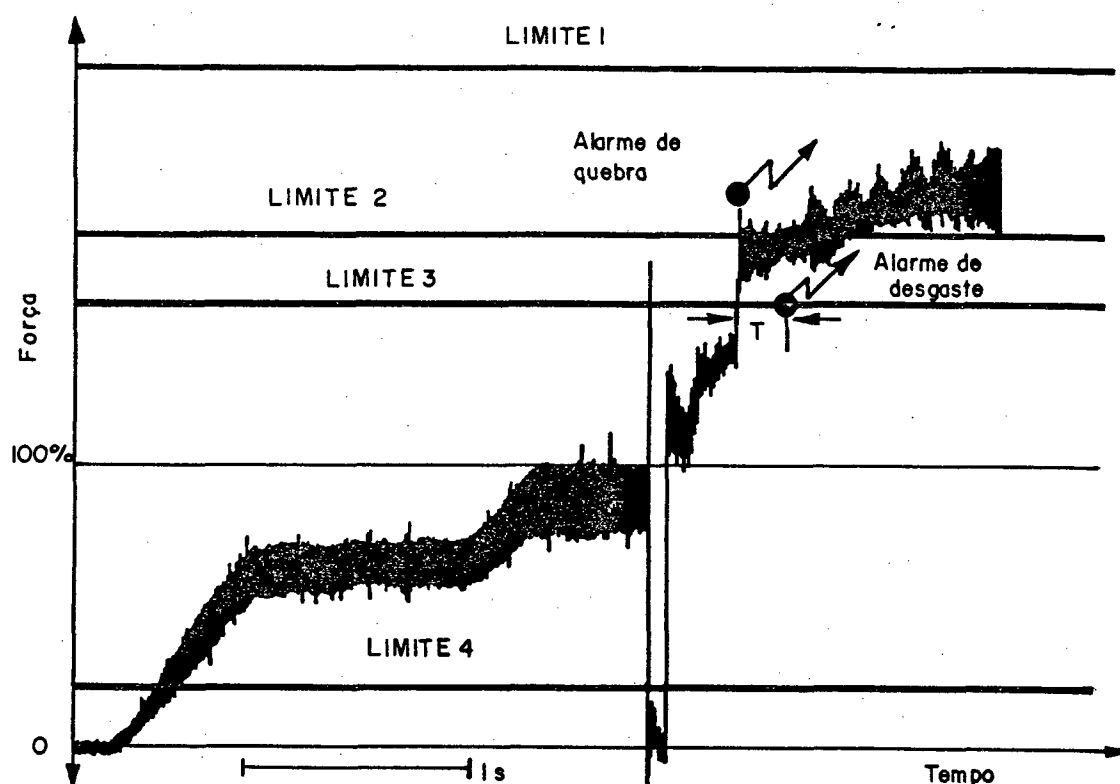


FIGURA 56: Reação do sistema de monitoramento em caso de quebra e desgaste da ferramenta [9,72].

A inércia da reação dos limites de reação neste modelo é necessária porque, em caso contrário, os impulsos de sinais decorrentes do travamento de cavacos ou flutuações de dureza levariam a indicações errôneas no sistema. Só quando ferramentas quebradas após uma rotação da peça novamente tangenciam a peça, os valores da força de usinagem aumentam consideravelmente e os

limites 2 e 3 são ultrapassados para cima. O limite 2 reage rapidamente em decorrência do pequeno tempo de reação, ao passo que o limite 3 apenas reage mais tarde. No caso do desgaste de ferramenta, variações lentas da força de usinagem poderiam ultrapassar o limite 3 após o intervalo T.

A figura 57 mostra esquematicamente a integração de um monitor de processo em uma máquina ferramenta. No revólver da máquina-ferramenta foi montado um sensor de força, por exemplo uma plataforma de medição ou uma bucha de medição. Os sinais de carga vão para o sistema de monitoramento.

A interface entre o sistema de monitoramento e o controle (CLP) possibilita a sincronização entre o processo de usinagem e os dados armazenados no sistema de monitoramento. Ela deduz as informações de quebra de ferramenta, desgaste de ferramenta, colisão de máquinas-ferramentas, falta de peça na máquina ou falta de ferramenta e informa o CLP. Durante a colisão é transmitida a informação ao sistema de avanço, garantindo a paralisação do movimento de avanço da ferramenta.

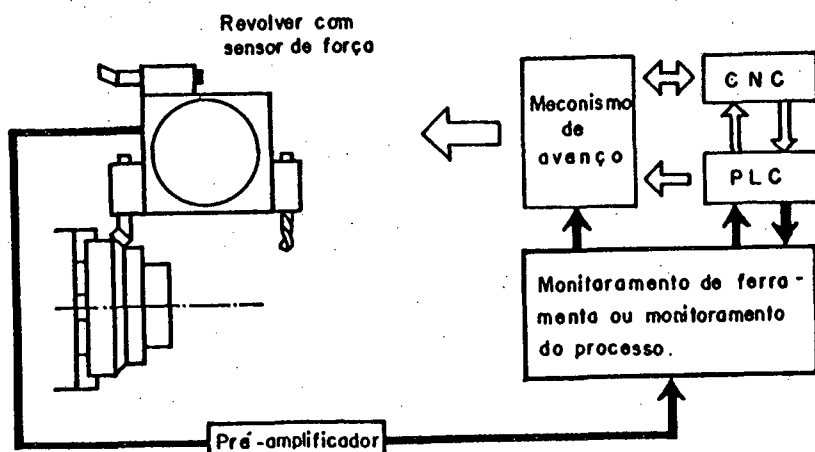


FIGURA 57: Integração de um sistema de monitoramento em um torno [9].

O monitoramento da retificação e do dressamento é efetuado pela medição de ruído decorrente do faiscamento, desgaste da ferramenta, variações de processo, colisão na máquina-ferramenta e erros no dressamento. Em decorrência do ataque cinemático da ferramenta na retificação, os detectores de ruídos levam a resultados mais satisfatórios que os sensores de força. De forma mais simples, o monitoramento da retificação ocorre pela utilização de limites estáticos, sendo que os sistemas de monitoramento são integrados ao sistema de monitoramento de processo.

A integração do sistema de monitoramento em uma retificadora é mostrado na figura 58.

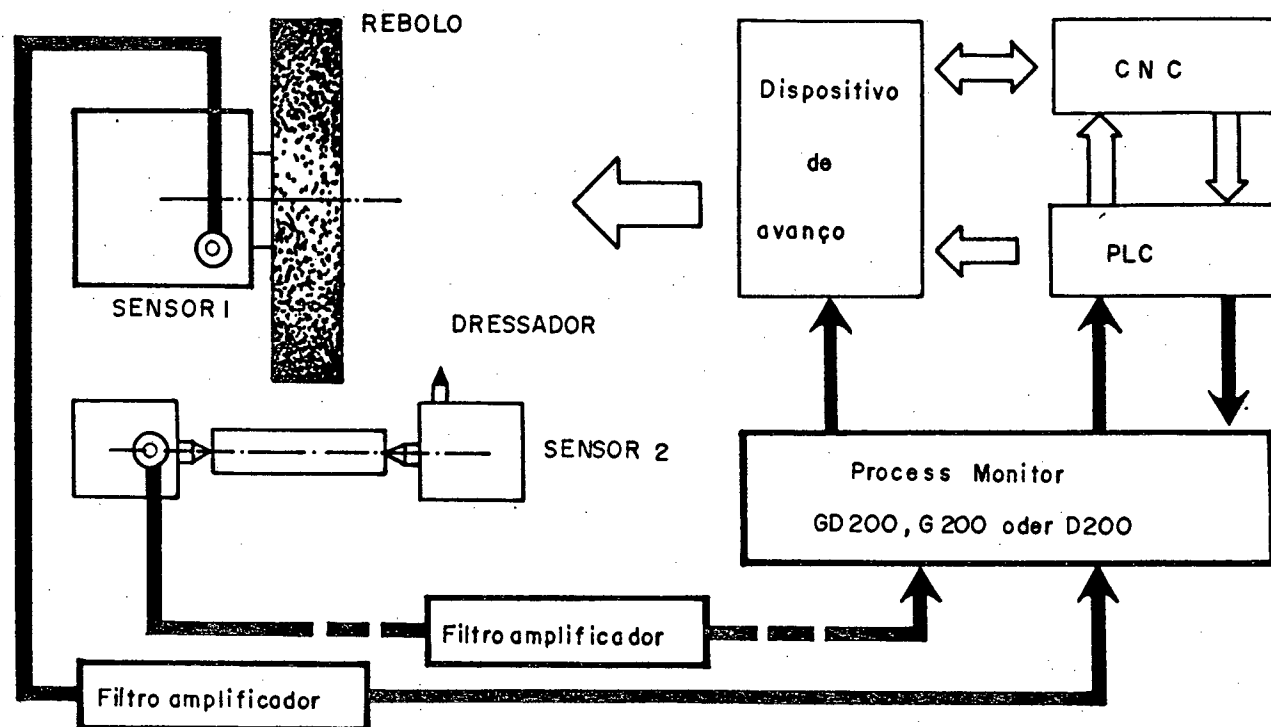


FIGURA 58: Integração do sistema de monitoramento em uma retificadora [9,92].

Dependendo do projeto e modo de operação da retificadora, é necessária a utilização de um a dois sensores. Os sinais de ruído são preparados em pré-amplificadores e filtros correspondentes fora do monitor de processo. A interface para a máquina ferramenta é praticamente idêntica aos sistemas de monitoramento para o torneamento, furação e fresamento. Na figura 59 está representado o sinal típico do nível de ruído obtido em uma operação de retificação de mergulho em uma retificadora Studer de Comando Numérico [115] que emprega um sistema de monitoramento GD 200 da Prometec GmbH [92] (vide anexo 1).

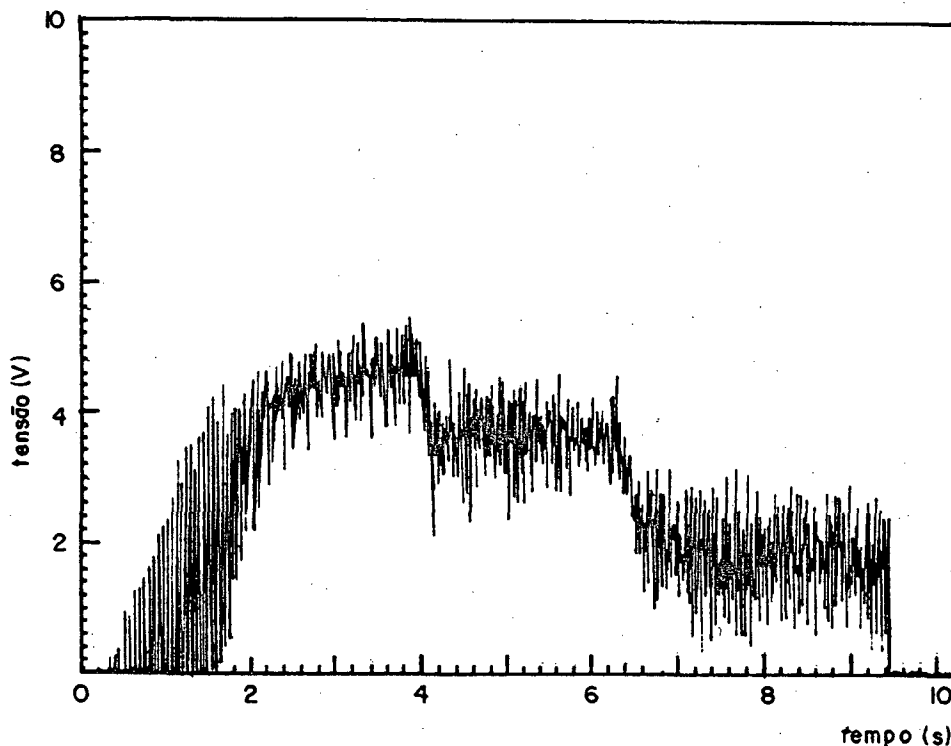


FIGURA 59: Fases do processo de retificação [116].

Observa-se que o nível de pressão acústica apresenta uma amplitude acentuada no início do ciclo, decorrente da excentricidade da peça. A medida que a circularidade e/ou excentricidade da peça melhora, o nível de pressão acústica

estabiliza para o valor típico do desbaste. Na segunda etapa tem-se um valor de nível de pressão acústica mais baixo, típico para o acabamento, e na terceira etapa o valor para o faiscamento. Quando o rebolo não tangencia a peça tem-se ainda um pequeno ruído de fundo. Para que um sistema de monitoramento com limites estáticos possa funcionar adequadamente tem que ter um diálogo contínuo entre o sistema de monitoramento e o CN e para cada ciclo deve-se ajustar o nível de pressão acústica de entrada para o sistema de monitoramento. Ajustando-se o sistema apenas para o nível de pressão acústica de desbaste, não será detectado as falhas no acabamento e faiscamento e piora-se a qualidade produzida. Ajustando-se o sinal de entrada para apenas o sinal de faiscamento, reconhecerá-se pequenos desvios de desbaste, como falhas ou até mesmo como colisões.

Nas passagens de desbaste para o acabamento e acabamento para faiscamento, o nível de pressão acústica não muda de forma abrupta no final da frase fornecida pelo comando a máquina ferramenta e ao sistema de monitoramento, e sim estabiliza gradualmente durante um intervalo de tempo que depende da rigidez do sistema máquina ferramenta - peça - rebolo (Constante Temporal). Consequentemente o sistema de monitoramento deve considerar o tempo de retardo, para cada nova frase CN.

Assim para o monitoramento do processo de retificação também dispomos de quatro limites estáticos (limites 1 a 4). O sinal de ruído típico para um ciclo normal de retificação é armazenado para valores 100 % (figura 60). Se no ciclo seguinte o limite inferior 4 é ultrapassado para cima, então este sinal leva ao reconhecimento do faiscamento inicial. Com isto, é possível reduzir os tempos vazios no início da retificação. A

ultrapassagem do limite 3 no mínimo por um tempo T_3 leva ao reconhecimento de um desgaste excessivo do rebolo, ao passo que a ultrapassagem do limite 2 e por um tempo T_2 detecta uma variação não desejada do processo. O limite 1 serve para o reconhecimento rápido de uma colisão da máquina-ferramenta. Uma ultrapassagem para cima do limite 3 pode ser usada para a indicação da necessidade de um novo ciclo de dressamento, ao passo que o limite 2 leva a um retrocesso automático da ferramenta. Se o limite 1 é ultrapassado, a máquina-ferramenta paralisa imediatamente o sistema de avanço do rebolo.

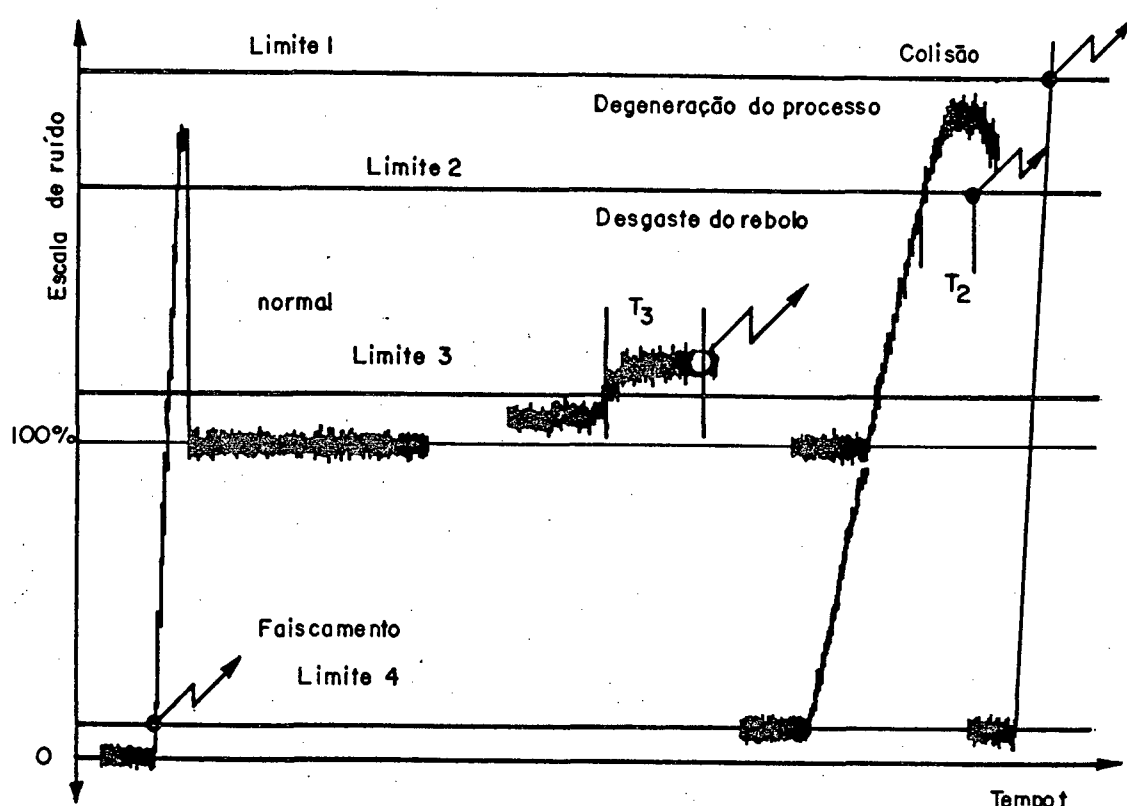


FIGURA 60: Reação do monitoramento de processo no faiçamento, com desgaste da ferramenta, com degeneração do processo e colisão [9,92].

Para o monitoramento do processo de dressamento, é suficiente empregar os limites 1 a 3, figura 61.

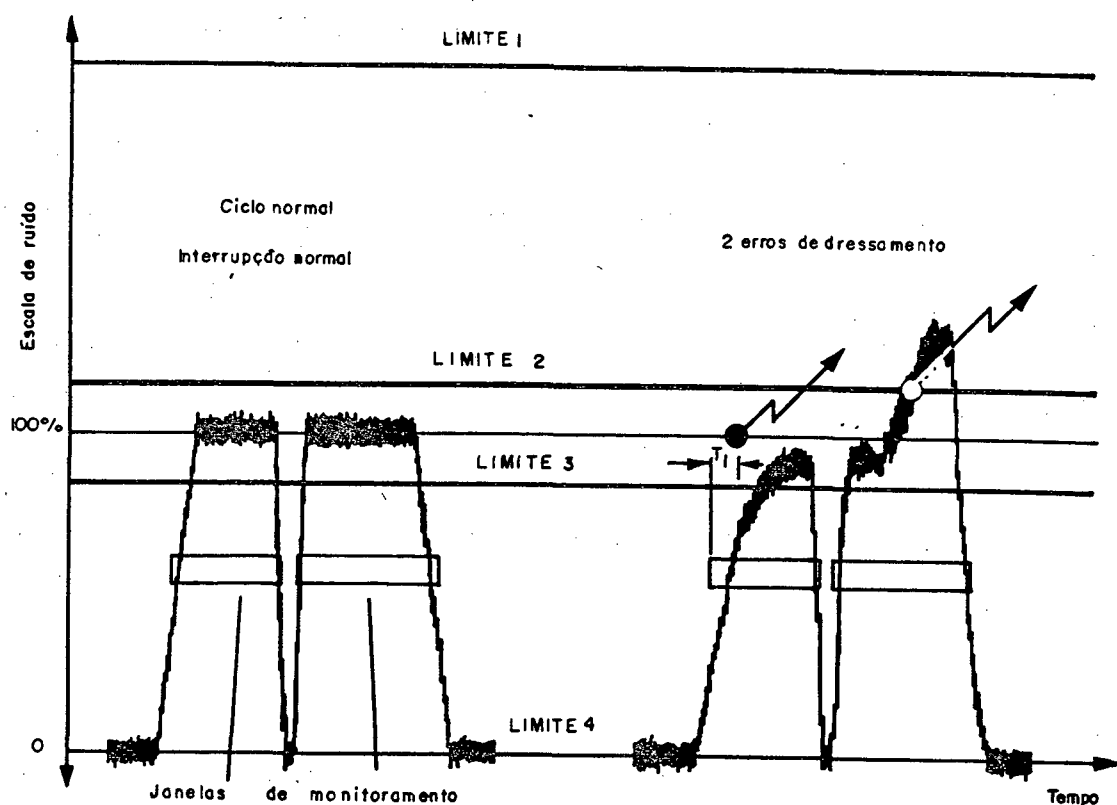


FIGURA 61: Reação do sistema de monitoramento em erros de dressamento [9,92].

No dressamento, o ciclo normal de dressamento é definido por uma janela de monitoramento que pode incluir várias interrupções. Levemente acima e abaixo dos limites 100 % encontram-se os limites 2 e 3. Dentro da janela de monitoramento, a qual pode ser definida pelo comando da máquina-ferramenta, o limite 3 no máximo pode ser ultrapassado para baixo pelo tempo T_1 . O limite 2 só pode ser ultrapassado para cima por um pequeno intervalo de tempo. Se ambos os critérios forem satisfeitos, o processo de dressamento é tido como satisfatório. Também no dressamento o limite 1 é empregado para o reconhecimento de uma colisão.

5.4.1.2 Técnica de Reconhecimento de Padrões

No modelo de reconhecimento de padrões o percurso de força por ciclo de usinagem NC é armazenado no software como no corte do modelo.

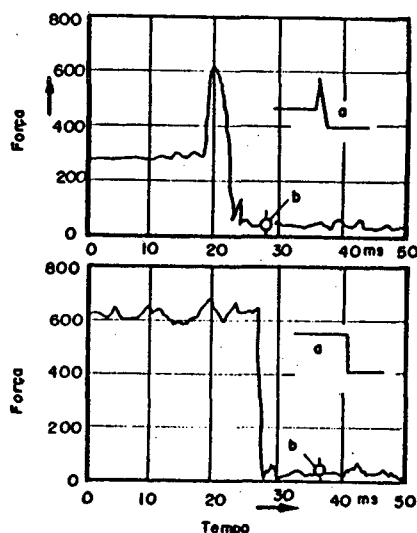


FIGURA 62 : Comportamento da força de usinagem e modelo de referência (parte superior quebra de uma ferramenta de metal duro, parte inferior quebra de uma ferramenta de cerâmica) [8].

a) Padrão de referência b) Reconhecimento da quebra

Em dependência do material de corte da ferramenta vários percursos de força para a quebra da ferramenta são armazenados em relação ao tempo. Assim obtém-se diferentes percursos de força registrados durante a usinagem e são comparados com os valores característicos típicos e atípicos do software. Esse método trabalha independente das forças absolutas e não necessita de treinamento [22] como mostrado na figura 62, porque estas formas de referência ocorrem relacionadas com o material da peça ou condições do processo, e não precisam ser aprendidas pelo sistema

depois da instalação na máquina ferramenta [8,70].

Como sensor é utilizado um sensor piezelétrico de três componentes que trabalha com as relações de forças entre si e que se modificam com a variação do desgaste e com isto pode-se concluir sobre o desgaste da ferramenta, figura 63.

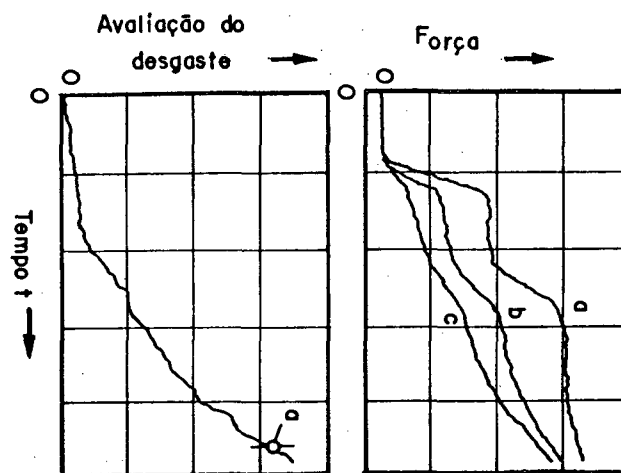


Figura 63: Comportamento das componentes de usinagem ao longo da utilização de uma ferramenta [8].

Parte superior - força de corte (a), força de avanço (b) e força passiva (c).

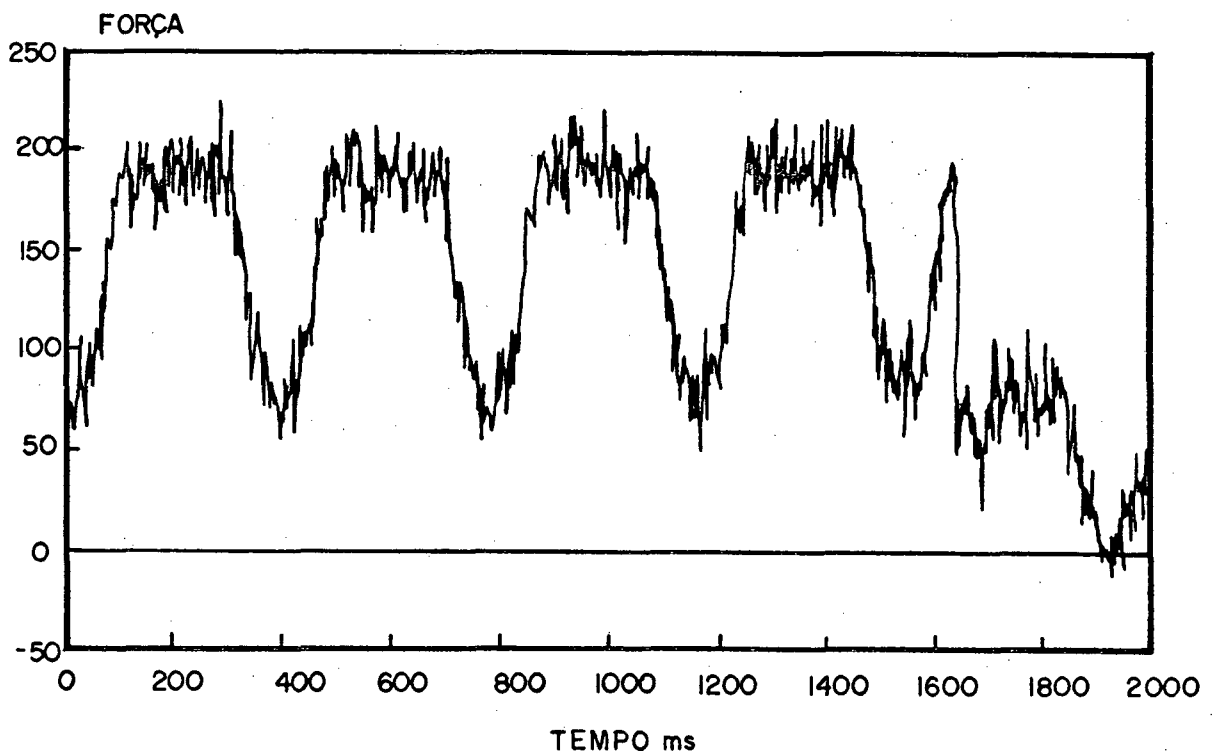
Parte Inferior: Valor calculado pela unidade de monitoramento para o desgaste.

No entanto, flutuações decorrentes de sobremedidas ou de variações da dureza têm influência sobre a relação de força, uma vez que a ferramenta está sujeita a condições de corte variáveis condicionadas e pela variação do contorno da peça bruta e/ou peça pronta, principalmente pela flutuação da profundidade de corte. As variações das componentes da força resultante se sobrepõem ao aumento da força de usinagem decorrente do desgaste e, em

decorrência disso, dificultam o reconhecimento do fim de vida da ferramenta. Para minimizar as variações dos valores medidos, que podem ocorrer aleatoriamente mesmo para condições de corte constantes, são sugeridas características como quocientes de forças e ângulos de orientação de força [1].

Um algoritmo de reconhecimento do modelo somente reage à variações na força de usinagem que conferem com o modelo de referência guardado. Variações nas condições do processo, como as variações nas dimensões do material bruto, sobrematerial da peça, usinagem com um ressalto, usinagem interrompido, não causam conferência com o modelo de referência guardado [70].

Na figura 64, a ferramenta de cerâmica em uma aplicação de torneamento é apresentada usinando uma peça com sobrematerial.



Força de Avanço (F_f)

FIGURA 64: Sobrematerial da peça - Quebra da ferramenta [70].

Ferramenta de cerâmica.

O instante da quebra da ferramenta é indicado em um gráfico, onde aparece a queda característica nas componentes de força F_f e F_p . Os níveis de força e variações relacionadas com o sobrematerial não provém indicação de falha da ferramenta. No ponto em que o inserto falha, o sistema de reconhecimento do modelo identifica as variações na força devido à quebra da ferramenta, e envia um sinal de parada de avanço para a máquina. Desta forma, ocorre a paralisação do movimento de avanço e o dano subsequente para a cunha, suporte da ferramenta, peça ou máquina é evitado.

Um procedimento semelhante trabalha diretamente com um sensor acústico cuja sensibilidade anteriormente é regulada com um assim chamado " pulser ". Durante o ciclo de monitoramento são analisados frequências ultrassônicas que ocorrem imediatamente antes de uma quebra em decorrência da formação de uma fratura. Assim é possível detectar a quebra de ferramentas rotativas até um diâmetro de 12 mm (Figura 65).

Devido a uma repentina queda na força, os níveis iniciais da força de usinagem são comparados com os níveis depois do tempo de interrupção. Diferenças significativas nos níveis de força antes e depois da interrupção conferem com os modelos de referência acumulados durante o restante da rotação da peça e causa a declaração contínua da condição de quebra da ferramenta pelo algoritmo de reconhecimento do modelo, isto ocorre normalmente dentro de um intervalo de 10 ms.

No entanto, as variações nos tipos de processos de usinagem, materiais de peças e ferramentas tornam insatisfatório este algoritmo, função de que estes dados concretos não podem ser transferidos para condições alteradas de usinagem. Porque, desta

forma, tornariam o processo anti-econômico pelo fato de aumentar o número de trocas de ferramentas pelo uso insuficiente da ferramenta, dos tempos secundários e tempo de máquina parada [2].

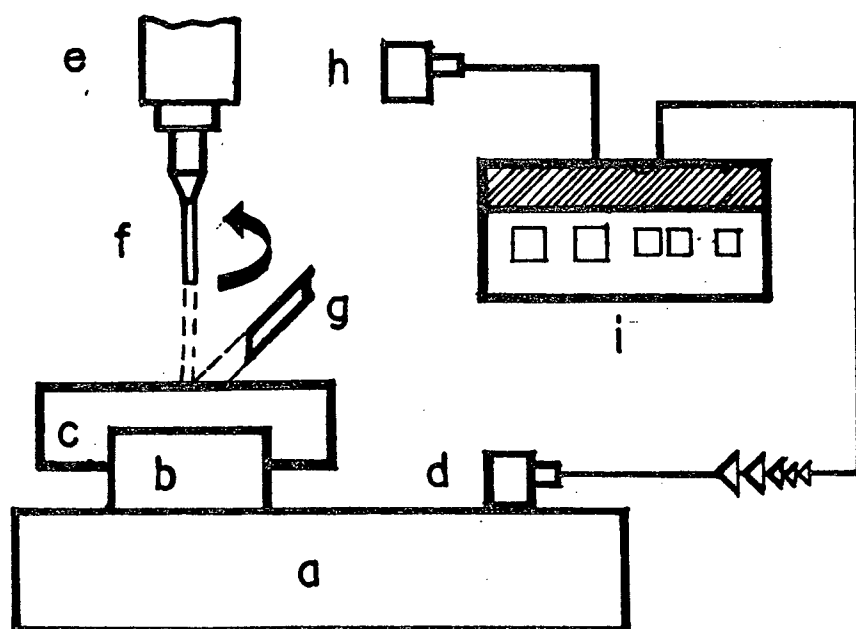


Figura 65: Monitoramento de quebra de ferramenta pela detecção de ondas ultrassônicas características (esquema funcional)
a) máquina b) unidade de fixação c) peça d) sensor, e) árvore da máquina ferramenta, f) broca, g) fluido de corte, h) pulsor, i) unidade de monitoramento [8].

Este modelo é utilizado pelas empresas Montronix GmbH [70,74,117-123] e Samco GmbH [124-125].

5.4.2 Limites Dinâmicos

Danos decorrentes de quebras de ferramentas, como suporte de pastilhas destruídas, peças perdidas ou componentes da máquina-ferramenta quebrados, só ocorrem no caso de se continuar usinando no mínimo após uma rotação da peça, após a quebra da ferramenta.

A figura 66 mostra exemplos de danos que ocorrem no caso de uma quebra total, embora o operador da máquina-ferramenta tenha desligado o avanço 0,8 s após a quebra. Nitidamente se reconhece a inutilização, devido à danificação dos elementos de fixação da ferramenta. A superfície da peça usinada está igualmente danificada. Ela mostra um entalhe logo após o ponto da quebra da ferramenta. O material da peça está plasticamente deformado e encruado.

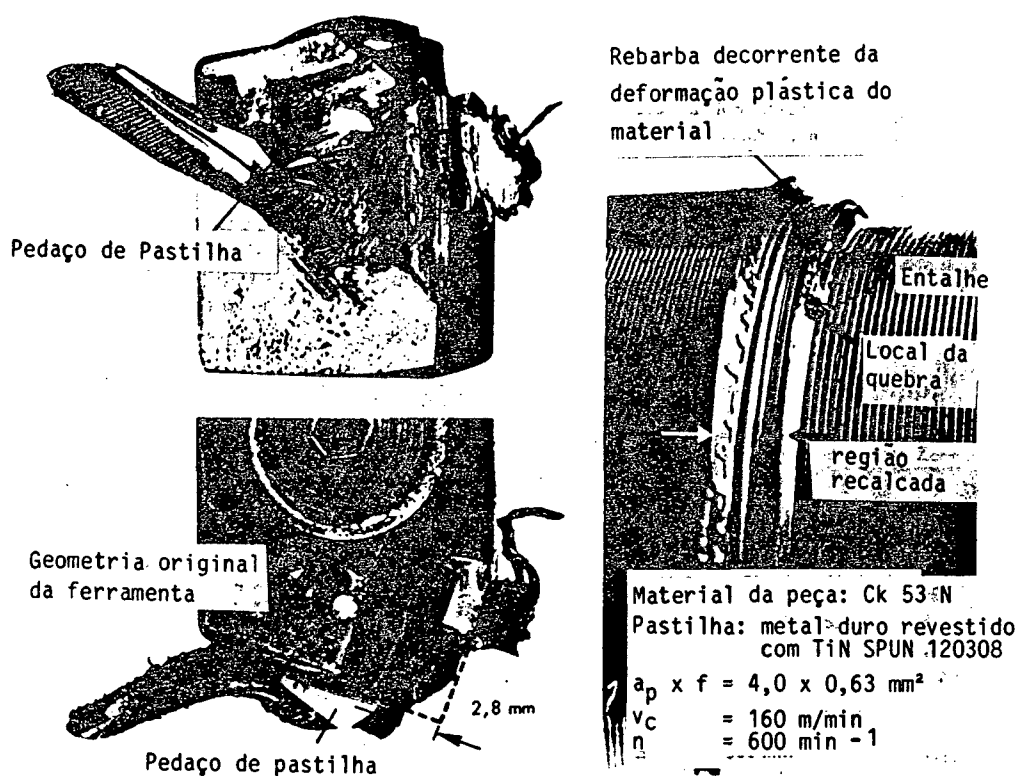


FIGURA 66: Ferramenta e peça após uma quebra total [9,126].

O aumento do sinal de força no momento da quebra da ferramenta é decorrente das partículas da pastilha que rolam entre peça e ferramenta, devido à pressão que o cavaco faz sobre

a ferramenta e do atrito na superfície de corte, fazendo com que a ferramenta seja flexionada por um pequeno intervalo de tempo. Nesse instante, as componentes da força de usinagem aumentam bruscamente em tempos que variam entre 0,1 a 0,3 ms (figura 67).

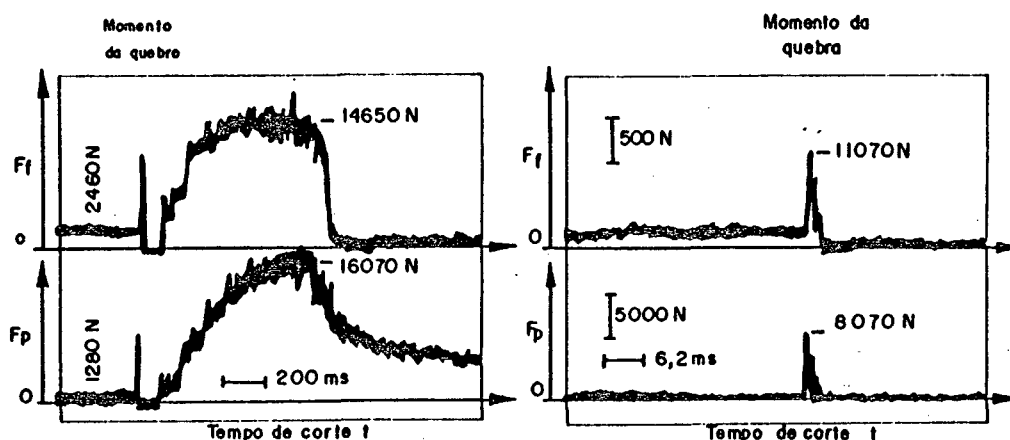


FIGURA 67: Desenvolvimento de forças em uma quebra total [9,126].

A seguir, no caso de uma quebra total, a força cai a valores iguais a zero, pois não existe mais contato entre a ferramenta e a peça. Em decorrência do avanço que continua atuando, a ferramenta quebrada entra novamente em contato com a peça (o mais tardar após uma rotação da peça), e consequentemente as componentes da força de usinagem aumentam a um valor várias vezes superior às que ocorriam antes da quebra da ferramenta. Nisto, a força de avanço e a força passiva podem atingir valores da ordem de quinze vezes superior ao valor original.

Para evitar danos decorrentes da quebra da ferramenta, o sistema de monitoramento reconhece rapidamente a variação brusca do sinal das componentes da força de usinagem e, através de um

modelo de monitoramento correspondente, leva à paralização do movimento de avanço antes que a peça tenha completado uma rotação na máquina-ferramenta. Só com isto, é possível evitar o aumento excessivo das componentes da força de usinagem decorrente da quebra, e assim evitar os danos ou as perdas consequentes.

Este fato tornou necessário o desenvolvimento de monitoramento com limites dinâmicos. Neste sistema os limites de operação admissíveis só são formados a partir do próprio sinal que está sendo monitorado. O monitoramento com limites dinâmicos só é realizado com a técnica "Teach-In".

Na figura 68 pode-se observar que no início do corte a seção de usinagem é pequena e a dinâmica do sinal correspondente também é pequena. Com o gradual aumento da seção de usinagem, ou dureza do material, a dinâmica do sinal aumenta. Os limites superior e inferior são formados numa proporção à dinâmica do sinal e o seguem com um certo retardo.

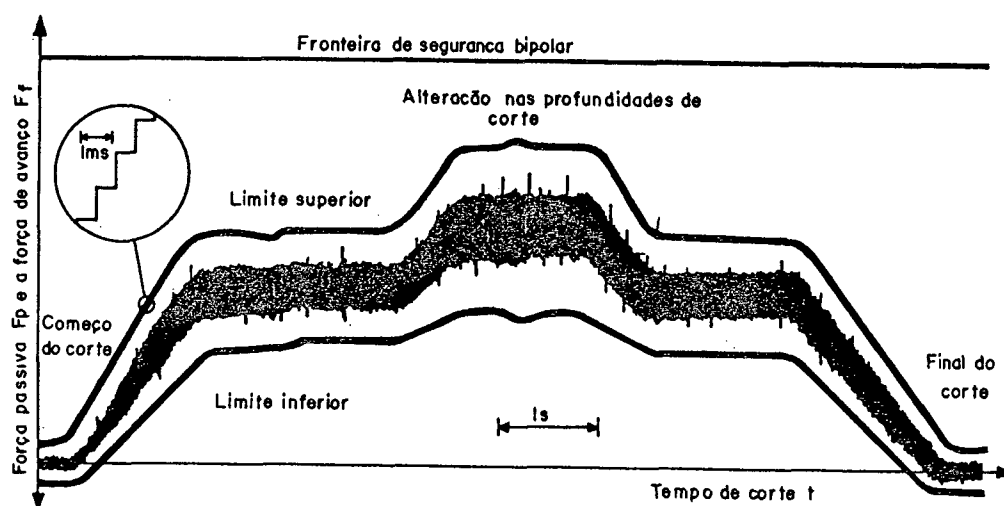


FIGURA 68: Ajuste dos limites variáveis a um sinal de força [9,126].

A memorização dos dois limites não ocorre. Eles sempre são adaptados automaticamente ao sinal de força atual. Em decorrência da velocidade limitada de adaptação às variações súbitas do sinal, como são típicas a uma quebra da ferramenta, chega-se a valores maiores ou menores que estes limites em uma certa sequência. A velocidade de adaptação dos limites é definida de tal forma, que ao ocorrerem variações bruscas de força no momento da quebra, os limites não conseguem mais se adaptar. Devido a isto, uma passagem acima ou abaixo dos limites superiores e inferiores só ocorre no caso de uma quebra da ferramenta ou variações muito bruscas dos esforços.

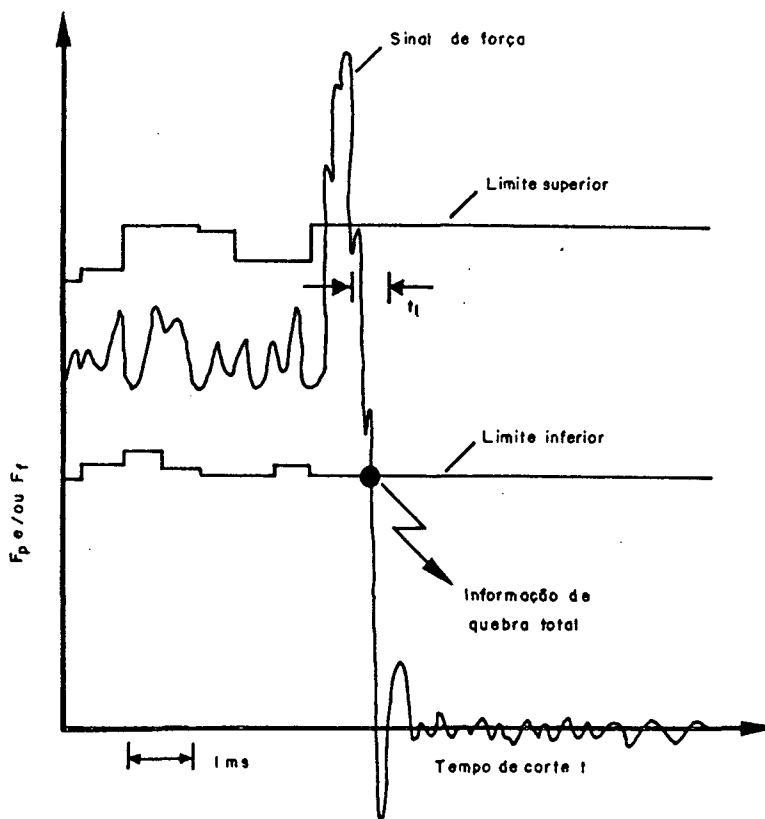


FIGURA 69: Estratégia de reconhecimento da quebra e quebra total por ultrapassagem do limite superior [9,126].

Para o reconhecimento de quebras, figura 69, o sinal de força inicialmente deve ultrapassar o limite superior, retornando logo em seguida a valores inferiores a este. Se após isto, num intervalo de tempo muito curto t_1 , o limite inferior é ultrapassado para baixo, ocorre a informação da quebra.

No caso de uma quebra na qual o limite superior não é ultrapassado para cima (por exemplo, na utilização de cerâmica de corte), a informação da quebra da ferramenta só ocorre quando o limite inferior é ultrapassado para baixo ao menos pelo tempo t_2 (figura 70).

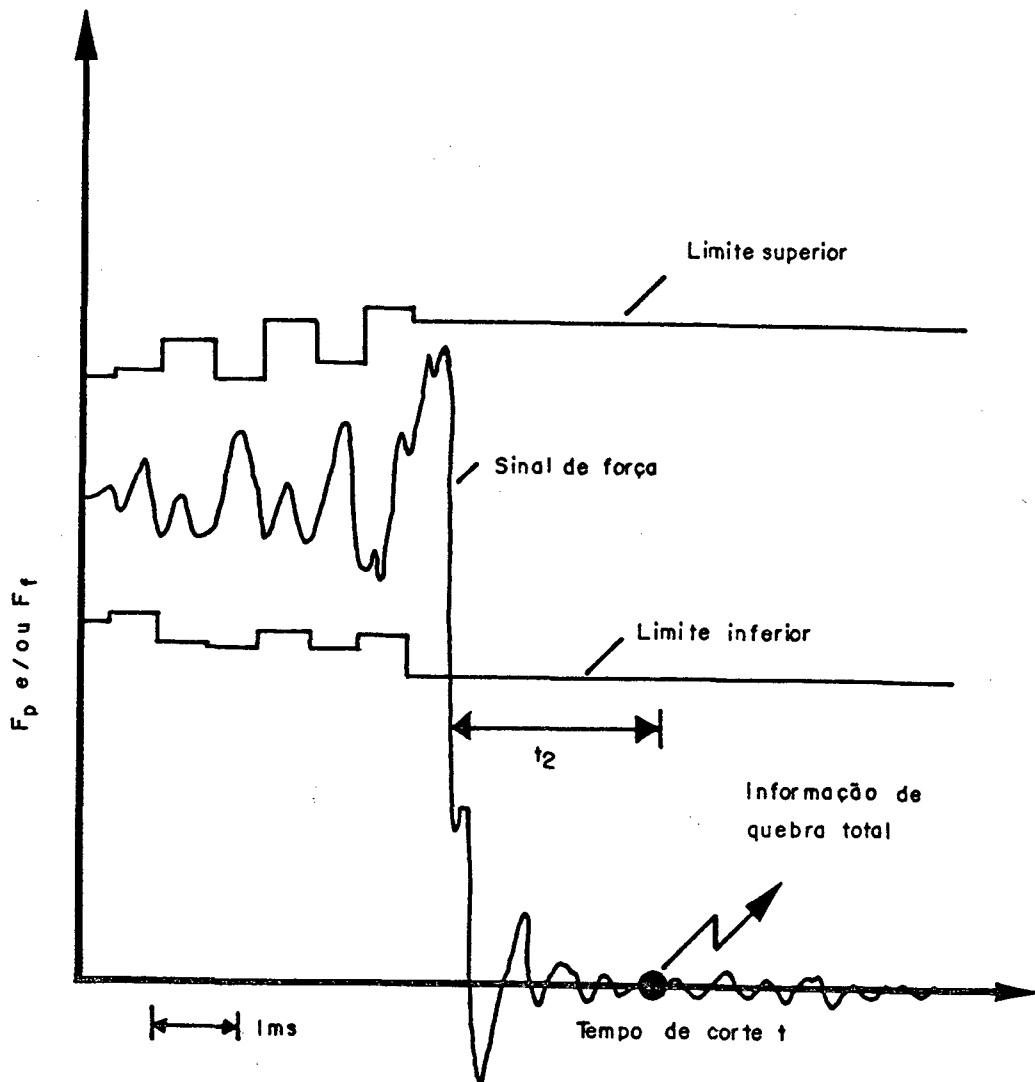


FIGURA 70: Estratégia de reconhecimento da quebra e quebra total sem ultrapassagem do limite superior [9,126].

Estes tempos devem ser informados ao sistema de monitoramento de ferramenta e corresponde a um maior intervalo tempo sem corte que pode ocorrer em uma rotação da peça, em decorrência da usinagem de peças com pequenos furos, rasgos de chaveta, etc.

Os limites dinâmicos toleram variações de força decorrentes de variações de sobremedida ou da dureza da peça numa relação de 1 a 4 vezes sem informar sinais errôneos de quebras de ferramenta. Informações falsas, como as que ocorrem em sistemas de monitoramento com limites estáticos para variações de sinais de força, praticamente são excluídas.

Em pregando-se sistemas de monitoramento com limites dinâmicos os danos decorrentes de uma quebra da ferramenta podem ser restringidos à perda da pastilha ou, no máximo, à pastilha de suporte, como consequência do reconhecimento rápido da quebra. O mesmo modelo também é empregado para ferramentas na furação.

A flutuação da força de usinagem, decorrente do desgaste da ferramenta, é acompanhada das variações da força de usinagem, relacionadas com a peça e ocasionadas pela variação da sobremedida ou profundidade de corte, bem como variações na dureza da peça. Para realizar o reconhecimento do desgaste da ferramenta da forma mais precisa possível, as variações perturbadoras da força de usinagem são praticamente eliminadas no sistema de monitoramento de ferramentas.

Pesquisas abrangentes realizadas no Laboratório de Máquinas-Ferramenta da Universidade de Aachen (WZL) levaram à conclusão que para o torneamento, furação e fresamento a metodologia do "Método de Medição em Ponto Definido" é a que oferece os melhores resultados (figura 71). Para esta realização, o programa de

usinagem define ao sistema de monitoramento pontos precisos de medição na peça durante a usinagem, para os quais os valores limites de força de corte são armazenados e comparados peça por peça.

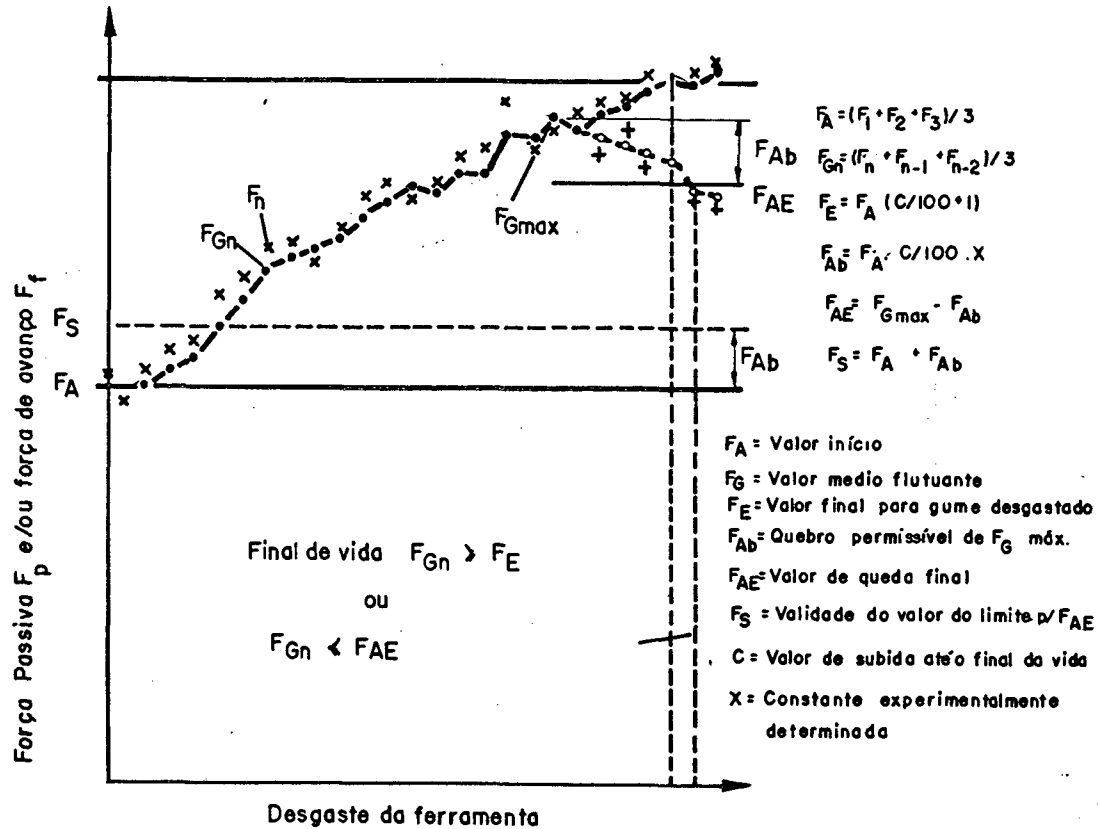


FIGURA 71: Estratégia para reconhecimento do final de vida [1,9,126].

Para a minimização da influência de variações da força de usinagem, consequentes da peça ou do material da peça, empregam-se as seguintes técnicas:

- Não circularidade da peça ou não planicidade da peça:
 - Filtro passa-baixo
 - Integração do sinal sob ciclo
- Variação de um valor médio do sobremetal que leva à flutuação da força de usinagem, decorrente da variação da profundidade de corte; flutuação da força de

usinagem, conseqüente de variação das propriedades do material.

- Valor médio flutuante.
- Grandes flutuações devido à variações na composição do material da peça:
 - Reconhecimento da queda da força de usinagem.
 - Determinação automática dos limites de reconhecimento pelo fator de aumento de força "C".
- Diminuição da força de usinagem decorrente do desgaste de cratera:
 - Reconhecimento da diminuição da força.

5.4.3 Sistemas Multi-Modelos

Sistemas multi-modelos contém mais do que um modelo para que a performance geral dependa das interações entre esses modelos.

Os sistemas multi-sensores necessitam de modelos altamente sofisticados ou as vezes mais um modelo trabalhando os sinais dos sensores. Adicionalmente, os sensores tem que ser aplicados tão próximo quanto possível da característica de interesse para ser capaz de obter sinais, os quais correspondam o mais próximo da variável controlada.

Existem muitas combinações possíveis de sensores e modelos. Na maioria das aplicações práticas um sensor mede somente uma grandeza física. A variável medida é produzida por um modelo que transfere uma característica monitorada do objeto de medição. Ainda, existem vários caminhos para obtenção do sinal ótimo:

A primeira é produzir um sinal de um sensor através de vários modelos com o objetivo de obter-se mais características de

interesse do objeto de um sensor. Esses sistemas são chamados de Multi-Modelos.

A segunda possibilidade é a evolução de sinais de vários sensores através de um modelo com o objetivo de obter-se uma característica de interesse. Esses sistemas que podem produzir mais resultados porque o modelo recebe informações mais detalhadas acerca do processo.

A tabela 2 oferece uma visão geral dos princípios mencionados acima.

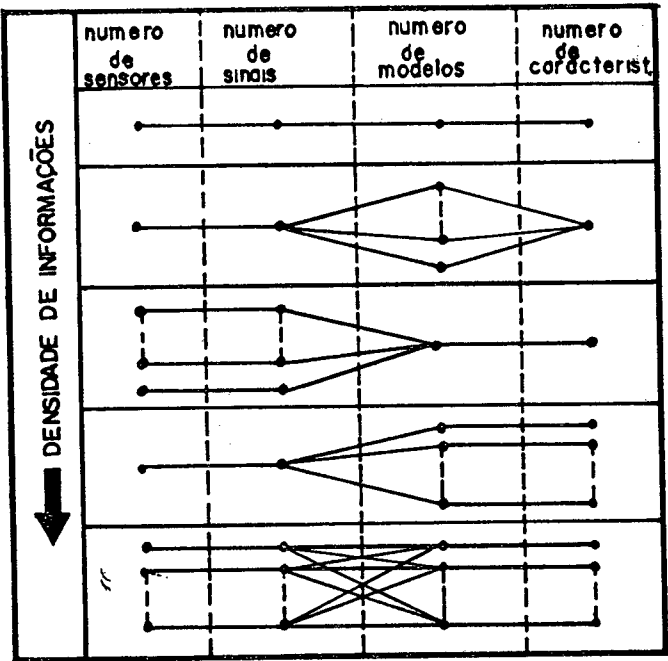


TABELA 2: Algumas possibilidades para combinar Modelos e Sensores [6].

As diferentes possibilidades são o número de sensores, modelos e condição de armazenamento. O aumento da densidade de informações é também indicado. O uso de mais sensores e modelos resulta num processo de monitoramento mais confiável e mais flexível aumentando a possibilidade de um controle bem melhor. Na atualidade, existem poucos sistemas sob investigação que tabalham

como descrito acima. Um exemplo de sistemas atual está mostrado na figura 72.

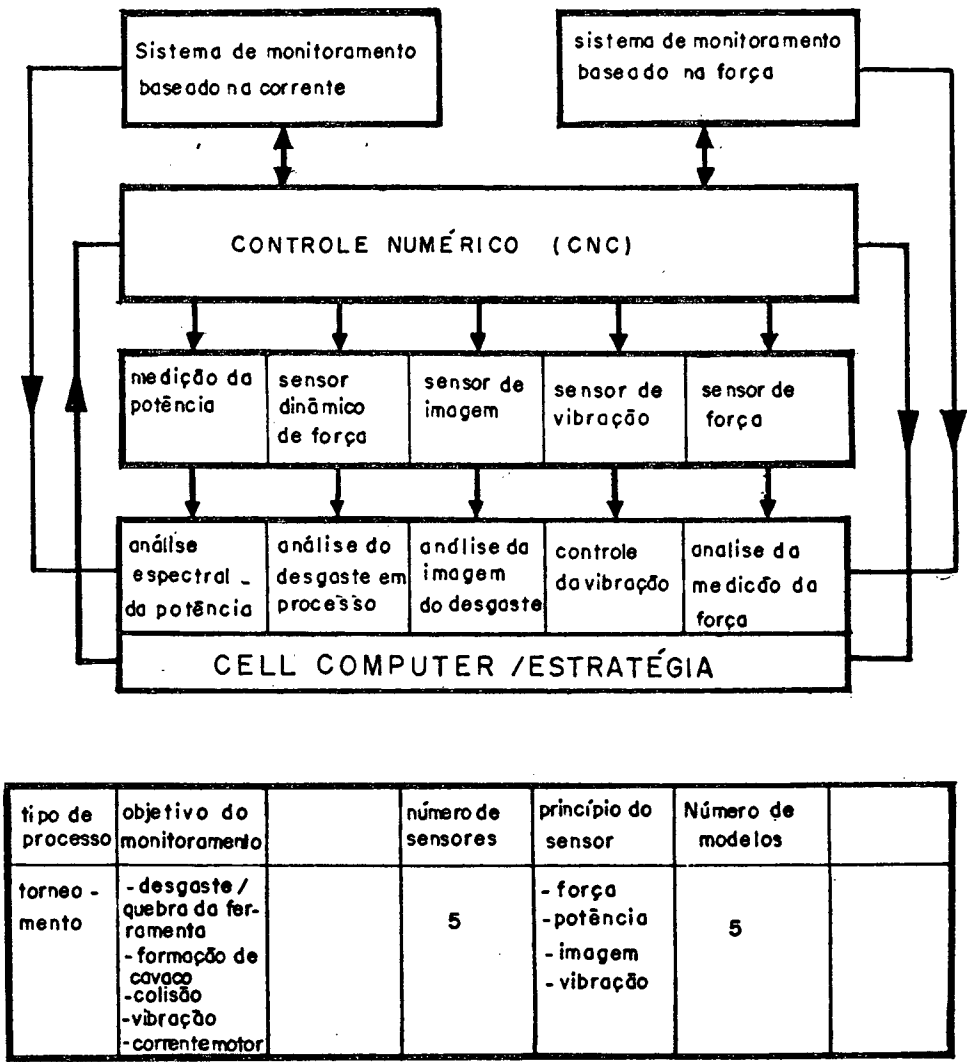


FIGURA 72: Exemplo de um sistema multi-sensor e um sistema multi-modelos [6].

5.5 Sistemas Comerciais

No anexo são discutidas as características de diversos sistemas de monitoramento [90-134] (vide anexo 2).

ANÁLISE PARA IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO

6.1 Critérios para a Escolha de um Sistema Adequado

Para muitos usuários a aquisição de um sistema adequado de monitoramento é uma tarefa muito difícil, pois exige uma orientação adequada para a escolha do sistema correto. Como visto anteriormente, de acordo com os fabricantes os sensores e unidades de processamento são divididos em grupos de prioridades para aplicações específicas. Portanto, antes da aquisição da unidade de monitoramento deverá ser feita uma análise da função específica a ser monitorada na fabricação. Os critérios a serem considerados na análise são os seguintes [6]:

1. Que tipo de processo está sendo monitorado?
(Isto é: Torneamento, fresamento, furação, ...)
2. Que tipo de monitoramento está sendo usado?
(Isto é: Monitoramento, Diagnose, Controle...)
3. Quais as condições do processo que estão sendo monitoradas?
Qual é o objetivo deste monitoramento?
4. Quantos sensores estão sendo usados?
5. Quais os princípios físicos dos sensores que estão sendo aplicados?
6. Que tipo de processamento e modelamento do sinal que está sendo usado?

Uma possibilidade é a limitação para apenas o controle de colisão. Isto pode, de acordo com a aplicação (o que é o caso quando os custos consequentes de uma colisão são consideravelmente maiores que os custos causados pela influência do desgaste da ferramenta) ser uma estratégia adequada. Basicamente, no caso de uma colisão, devemos reconhecer o ponto da colisão. Se o ponto de colisão está situado entre ferramenta e peça, em regra geral, os custos de colisão serão menores e facilmente evitados [8].

Um termo que leva a interpretações errôneas é o termo de "Zero colisões (ou evitar-se colisões)". Mesmo para tempos de reações extremamente curtos (são indicados tempos em torno de 5 ms), em regra, a colisão já ocorreu. A influência física de massa e aceleração é variável para tamanho e tipo de máquina ferramenta. A probabilidade de se ter erros consequentes em máquinas pequenas e compactas é muito maior que em fresadoras de grande porte. A influência da inércia da massa de componentes móveis em tornos é muito menor o que permite que o processo de usinagem pode ser interrompido rapidamente. Entretanto, o fator mais importante no monitoramento da colisão é o fato de reduzir-se as interferências entre as partes colididas como, por exemplo, diminuir a interferência dos componentes da máquina-ferramenta com a peça de 4 mm para 1 mm, e por consequência reduzindo ou eliminando os esforços na estrutura da máquina-ferramenta. Desta forma, o monitoramento da colisão é bastante adotado na prática.

De acordo com o processo de fabricação a quebra da ferramenta tem se mostrado com resultados bastante diferentes. Assim, no monitoramento do torneamento, e em grande parte também

na furação, já foram realizados trabalhos com bastante sucesso.

No fresamento a detecção da quebra da ferramenta é mais problemática. Já que o número de gumes atuantes que devem ser monitorados exige no fresamento (em comparação com o torneamento e a furação) um empreendimento técnico mais elevado principalmente em " Know how ". Em decorrência disto em muitos casos os custos já na fase inicial da aquisição do sistema são bastante elevados. E isto é de sobremodo acentuado na detecção do desgaste.

Só para o torneamento a realização da detecção do desgaste pode ser considerada parcialmente realizada. Assim, o reconhecimento do fim da vida por atingir-se um limite de desgaste só pode ser considerado para as ferramentas mais críticas. Sistemas de produção podem e devem ser equipados com sistemas de monitoramento de uma forma generalizada. Se o lote é menor que a capacidade de corte da ferramenta como, por exemplo, é o caso em sistemas flexíveis de fabricação, e necessita-se somente de um controle off-line do desgaste da ferramenta, um fabricante recomenda um sistema de monitoramento de desgaste por apalpação na quina da ferramenta, que possui um custo em torno de 300 marcos (Sistemas Indutivos, tais como os dos fabricantes TESA e PERTH), no entanto, recomenda sistemas de monitoramento de quebra e colisão por meio de sensores de medição de força [1,].

Em relação a lotes mínimos para sistemas flexíveis de fabricação, os limites estão situados entre 2 a 5 peças, mas isto não impede que se trabalhe, por exemplo, com apenas 1 peça, já que existe a possibilidade de se armazenar as informações obtidas para a fabricação de uma peça que se repete e reutilizar estes dados quando reaparece esta peça ou lote.

Um critério que não pode ser desconsiderado para a avaliação de um sistema de monitoramento é a sua susceptibilidade à indicações errôneas. Pode-se efetuar uma correlação entre a complexidade e a susceptibilidade de indicações errôneas de um sistema, após uma precisão maior e um sistema de diagnóstico mais complicado também exigem uma eletrônica mais complexa.

Langguth e Weber [8] relatam que para as dificuldades que eventualmente ocorram para a escolha adequada de um sistema de monitoramento usuários maiores elaboraram planilhas para a decisão de aquisição de sistemas de monitoramento. Além dos critérios puramente técnicos também se efetua a escolha através de outros critérios. Entre estes são analisados a susceptibilidade de indicações errôneas, as possibilidades de mudar a software, o envelhecimento do sistema, o custo de introdução do sistema, as condições de manutenção e garantia de manutenção do sistema, bem como assistência técnica por parte do fabricante do sistema. Isto deve ser considerado, cada fabricante considera estes pontos de forma diferente.

Por último, deve-se considerar o procedimento de monitoramento em decorrência da influência das grandezas que permitem reconhecer o desgaste como sendo uma grandeza que garante a qualidade do monitoramento. Estes aspectos e também os citados anteriormente devem ser considerados de sobremodo na instalação primária de um sistema de monitoramento.

6.2 Fase Introdutória do Sistema de Monitoramento

Quando existe clareza sobre os objetivos, bem como sobre o tipo e a abrangência do sistema de monitoramento que deve ser

adquirido, o usuário deve pensar na fase introdutória do equipamento, principalmente após a aquisição do sistema. Neste período deve-se considerar os problemas e dificuldades que normalmente surgem numa fase inicial. Estes problemas são tanto menores quanto melhor for a preparação para a introdução do sistema de monitoramento.

Antes do início devem ser esclarecidas as funções e deveres e a capacidade do pessoal existente na fábrica. Assim, por exemplo, faz sentido acolher tanto o mestre do setor como o operador da máquina já na fase de planejamento para a introdução do sistema e, com isto, ter fatores que auxiliam na escolha do sistema de monitoramento [6,8-9]. Os diversos desconfortos de operação são só apenas um dos fatores que devem ser considerados: um sistema que não oferece um conforto de operação muitas vezes leva a frustração dos operadores, que por fim levam a rejeitar o equipamento. Além disso, é de se considerar que já na fase introdutória do sistema, os operadores tenham confiança no sistema de monitoramento. Isto ocorre o tanto quanto mais cedo os operadores são adequadamente instruídos. Também, antes da aquisição de um sistema, o operador vai se esforçar em fazer o equipamento funcionar e otimizar o mais rápido possível para um funcionamento pleno.

Um curso intensivo para os operadores também pode levar a um encurtamento considerável da fase introdutória do sistema no setor produtivo. Os tempos de aprendizado e também os tempos para regulagem dos fatores no sistema de monitoramento também devem ser considerados nos cálculos de tempos para introdução do sistema (veja o item posterior). Esses tempos de aprendizagem dependem do pessoal, da função de monitoramento e do sistema de

monitoramento, no entanto, são necessárias (condicionado pelo desejo de se ter uma aplicação otimizada resultante do "Teach-In" adequado), desta forma este custo que se tem com o aprendizado também leva a uma rentabilidade maior do sistema.

Neste ponto se observa o benefício dos convênios entre fabricantes de sistemas de monitoramento e as universidades, onde permite-se desenvolver palestras, trabalhos de pesquisa para o desenvolvimento dos sistemas, bem como sua implantação junto aos fabricantes de máquinas-ferramentas e seus usuários.

Após a fase introdutória deve-se pensar em verificar continuamente a função do sistema de monitoramento e eventualmente fazer a manutenção necessária. Como consequência disto, também o pessoal da manutenção deve ser instruído adequadamente por pessoal técnico adequado. A multiplicidade dos sistemas e as exigências especiais para as diversas variações de sistemas fazem novas exigências aos funcionários da manutenção. Também aqui devem ser considerados os trabalhos de manutenção feitos por terceiros (por exemplo, pelo fabricante).

Durante a fase dos primeiros testes e otimização da unidade de monitoramento também ocorrem dificuldades técnicas que geralmente não são previsíveis. Isto vale de sobremodo quando se trata de uma máquina ferramenta retrofitada. Os fabricantes dos sistemas se esforçam em ajudar especificamente nestes casos, no entanto, muitas vezes deve-se contar com tempos de parada de máquina inevitáveis. Os tempos de parada de máquina podem ser decorrentes da dificuldade da otimização dos dados introduzidos no sistema de monitoramento.

Frequentemente ocorrem desligamentos errôneos porque ocorrem influências não previsíveis por parte da peça ou da máquina

ferramenta. Para a modificação de uma para outra peça também teremos um empenho complementar para o operador, porque é de sobremodo crítico para máquinas ferramentas utilizadas de forma flexível. Para a regulagem de um sistema de monitoramento com fatores para o reconhecimento de fim da vida, por exemplo, para a mudança de peça deve-se contar com alguns minutos por homem [1].

Se estes fatores importantes são considerados desde cedo e se de sobremodo foi escolhido um sistema de monitoramento adequado podemos considerar que, em regra, estes sistemas funcionam de forma muito satisfatória para os usuários. Também as exigências na produtividade do sistema podem ser cumpridas satisfatoriamente para uma escolha e um planejamento adequado da introdução do sistema de monitoramento.

6.3 A Produtividade é Decisiva

O fator produtividade aparentemente para o usuário de um sistema de monitoramento traz duas definições contrárias entre si: por um lado, a aquisição de um sistema basicamente tem o objetivo de aumentar a produtividade da produção; por outro lado, no entanto, só um sistema tecnicamente analisado e empregado para um caso específico de monitoramento comprova se todas as grandezas e influências sobre o processo de usinagem foram avaliadas corretamente e se o sistema trabalha de forma confiável. Pois só depois da instalação de um sistema tecnicamente adequado a preposição de se trabalhar economicamente também é cumprida. Em nenhum caso podemos afirmar se o sistema tecnologicamente mais caro seja também o mais adequado para o caso específico [8].

A confiança do operador ao sistema só pode ser atingida se o sistema trabalha de forma confiável. Só então seja quando, por exemplo, pela usinagem sem operador durante intervalos de lanche, almoço e períodos noturnos se atinge uma produtividade mais elevada, o objetivo de um aumento da produtividade foi atingido.

Uma consideração diferenciada correlacionada com desgaste, quebra e colisão deve ser levada em conta. Mais crítico que a quebra e a colisão é a problemática do reconhecimento de desgaste. Assim, por exemplo, o empenho de programação na máquina de comando numérico deve ser considerado que é necessário eliminar uma situação de perturbação. Após a verificação de uma perturbação a usinagem deve ser interrompida, a peça deve ser retirada do ciclo de usinagem e a usinagem deve ser terminada em uma outra peça, isso de sobremodo exige um planejamento adequado em máquinas automáticas. O quanto mais complexo for a grandeza a ser monitorada (no reconhecimento de desgaste, por exemplo: o reconhecimento do fim da vida), o tanto mais alto vai ser o custo de instalação. Como, por exemplo, para um sistema de monitoramento que utiliza sensor de emissão acústica, onde a concepção é apenas para o monitoramento do faiscamento no processo de retificação tem um custo quatro vezes menor do que para o monitoramento completo do processo de retificação e dressamento [129].

Com o aumento da complexidade do processo de fabricação a avaliação dos custos parciais torna-se cada vez mais difícil. Em princípio, isto é decorrente da utilização desigual das diversas máquinas-ferramentas.

Como argumento contra a introdução de um sistema de monitoramento para o reconhecimento da quebra e/ou do desgaste da

ferramenta, por exemplo, são citadas as pastilhas relativamente baratas utilizadas na usinagem. Os custos de uma pastilha (em parte consideravelmente mais baixos do que 10 DM por pastilha) permitem duvidar de uma justificativa para um investimento intensivo em uma unidade de monitoramento. No entanto, um contra-argumento, são os custos das peças. Como, por exemplo, na fabricação de peças para a indústria aeronáutica, onde o material da peça (por exemplo, ligas de Titânio e de Alumínio [127-128]) possui um custo extremamente alto, não permitem em qualquer instante perturbações durante sua usinagem. Na fabricação de grandes séries, de sobremodo para o torneamento, os sistemas de monitoramento se impuseram na fabricação mecânica.

No fresamento o reconhecimento da vida por atingir-se o limite de desgaste das ferramentas é de sobremodo interessante. O custo de recuperação de pastilhas para estas ferramentas, em decorrência do grande número de pastilhas, representa um custo muito elevado.

Para o monitoramento do processo de furação deve ser considerado que o reconhecimento da quebra e desgaste é bastante simples. Pesquisas mostraram, no entanto, que na maioria dos casos a quebra da broca nem sequer precisa ocorrer, pois imediatamente antes da quebra da broca ocorrem vibrações torcionais. Como, no entanto, muitos procedimentos de furação só são executados quando peças já estão pré-usinadas, em decorrência já representam um custo elevado, o reconhecimento antecipado nestes casos é de sobremodo interessante.

Para o monitoramento de processos de usinagem, tanto no desbaste quanto no acabamento, deve existir sempre o compromisso entre produtividade e empenho técnico necessário. Porque a

utilização de um sistema depende exatamente destas condições.

Considerando-se os custos para os elementos sensores, então os elementos indutivos e os elementos piezelétricos na forma de buchas e extensômetros são os mais baratos. Em contrapartida, os custos aumentam com o aumento das exigências e precisão dos sinais adquiridos. A plataforma e o anél piezelétrico são sensores mais caros que os citados anteriormente, no entanto, eles preenchem estas exigências. Uma análise realizada por um fabricante apresenta estas informações conforme pode ser visto na figura 73 [9,126].

Sensor de força	Custos do sensor	Facilidade de montagem	Seção de cava-co mensurável em aço apx f a partir de 2	Determinação da especificação dos sensores e posição medição
Plataforma piezelétrica	Aprox. $8 \times 10^3 DM$	Menos .boa	Aprox. 0.1 até 0.3 mm ²	Projeto
Anel de medição 1)			Aprox. 0.05 até 0.2 mm ²	Projeto
2 buchas expansoras			Aprox. 0.3 até 0.6 mm ²	Experimental
2 extensômetros piezelétrico	Aprox. $3 \times 10^3 DM$	Muito boa	Aprox. 0.6 até 1.0 mm ²	Experimental

FIGURA 73: Comparação entre sensores de força [9,126].

Outra importante informação é o fato de 90 % dos fabricantes utilizarem cancelas de luz e medição da corrente do motor,

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA A CONTINUIDADE DO TRABALHO

7.1 Conclusões

Processos de fabricação modernos exigem um monitoramento em tempo real para viabilizar as elevadas velocidades de corte em máquinas ferramenta caras com garantia de qualidade constante.

As características dos diversos processos de fabricação exigem a avaliação de grandezas próprias para cada processo ou ferramenta.

A análise dos diversos sistemas de monitoramento disponíveis no mercado mundial mostra que tanto o monitoramento do processo como também o monitoramento de ferramentas é viável para a maioria dos processos de fabricação usuais na produção de bens mecânicos.

Observa-se uma tendência em aumentar-se o número de sensores, bem como o número de processadores envolvidos no monitoramento, objetivando um aumento na segurança da informação.

Os custos dos sistemas de monitoramento permitem um amortização rápida pela economia de ferramentas e pela redução da manutenção preventiva e corretiva da máquina ferramenta.

7.2 Sugestões para a Continuidade do Trabalho

Para se ter um conhecimento mais amplo do monitoramento dos processos de usinagem será necessário a implementação de um sistema de monitoramento em uma máquina ferramenta CN. Com isso se torna possível analisar os tempos de resposta e interrupção efetiva do processo de usinagem em situações de desgaste e/ou quebra de ferramenta e/ou colisões.

Os diversos processos de fabricação fornecem sinais que podem apresentar características específicas para o processo. A avaliação destes sinais permite definir o melhor sistema de monitoramento para cada situação. Dispondo-se de um sistema de monitoramento concebido para o processo de retificação pela análise da intensidade acústica e de sistemas de medição de força pelo princípio piezelétrico, deverá ser verificado até que ponto as informações obtidas destes dois sistemas permitem obter informações seguras para processos como, por exemplo, na furação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] - KLUFT, Werner. Werkzeugüberwachungssysteme für die Drehbearbeitung. Aachen, PROMETEC, 1983. 130 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Westfaelischen Technischen Hochschule. Aachen, 1983.
- [02] - SCHAPERMEIER, E. Sonderdruck " Werkzeugbruch verhindern ". Frankfurt: Moderne Industrie, 1989.
- [03] - BOEHS, Lourival. Projeto e Implementação de um Sistema Computadorizado de Banco de Dados de Usinagem (CINFUS). Florianópolis, 1988. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica).
- [04] - KÖNIG, W., KUTZNER, K., SCHEHL, U. Körperschall als Basis der Prozessüberwachung. Industrie-Anzeiger, v. 11, p. 19-21, 1989.
- [05] - VÖHRINGER, Klaus-Dieter. Zerspanprozess-Überwachung in der Grossserie sinnvoll einsetzen. Daimler Benz, München, 1990.
- [06] - TONSHOFF, H. K, WULFBERG, J. P. KALS, H. J. J. Developments and trends in monitoring and Control of machining processes. Annals of the Cirp, v. 25, p.611-622, 1988.
- [07] - KÖNIG, W.; KNOP, M. Retificação: Métodos para prever o comportamento do processo. Máquinas e Metais. n. 301, Fev. 1991.
- [08] - LANGGUTH, Thomas, WEBER, Andreas. Werkzeug-Verschleiss und Bruchüberwachung beim flexiblen Drehen, Bohren und Fräsen. Werkstatt und Betrieb, v. 124, n. 1, p. 15-24, 1991.

- [09] - KLUFT, Werner. *Werkzeugueberwachung beim Spanen, Schleifen und Laserchweissen*. Aachen: PROMETEC, 1988, v. 16, 25 p.
- [10] - EYADA, Osama K. Dr. *Are Flexible Manufacturing Systems the Solution ?* Sponsored by CERTI. June 1991. Florianópolis.
- [11] - ISOTALO, J., KUOPALLA, R. Já existe um sistema eficiente de Monitoramento automático. *Revista Máquinas e Metais*, fev. 1992.
- [12] - LEPIKSON, Herman Augusto. *Padronização e Interação das Unidades de Fabricação, Inspeção e Manipulação de uma Célula Flexível de Manufatura*. Florianópolis, abril de 1990. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica).
- [13] - GRUCON. *Comando Numérico*. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.
- [14] - MACHADO, Aryoldo. *Comando Numérico aplicado às Máquinas Ferramenta*. Icone Editora Ltda. São Paulo, 1986.
- [15] - MAJIMA, Takehiko. Monitoração do processo de corte com sensores. *Máquinas e Metais*, p. 24-33, jan. de 1989.
- [16] - NORMAN EW. Alexandre. *O Planejamento de Processos Por Computador Com Exemplo De Aplicação em Operações de Furação*. Florianópolis, Julho de 1989. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica).
- [17] - CONSALTER, L. A. *Arquivo de dados Tecnológicos de Usinagem para a Determinação Automática de Condições de Corte em Torno com Comando Numérico*. Florianópolis, agosto de 1985. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica).
- [18] - SOCIETY OF MANUFACTURING ENGINEERS. *Tool and Manufacturing Engineers Handbook - Machinig*, 4. edition. Dearborn: one SME Drive. v. 1, p. 5-66 a 5-70, 1983.

- [19] - PRITSCHOW, Günther. Sensores de força e torque em máquinas ferramenta. *Máquinas e Metais*, p. 48-57, maio 1989.
- [20] - Autorenkollektiv. Schiess - Defries- Nachrichten 13 (1933), S. 31.
- [21] - TONSHOF.H.K., NOSKE. H. Machine Tool Monitoring Applied to Lathe Chucks. *Annals of CIRP*, v. 39, n. 1, p. 429-432, 1990.
- [22] - GABRIEL, Ulrich. Werkzeugüberwachung - ein Markt mit Zukunft. *Werkstatt und Betrieb*, München, v. 122, n. 12, p. 1057-1058, 1989.
- [23] - WZL TH. Prozessüberwachung beim Feinschneiden. Aachen: WZL, 1990. 1 f.
- [24] - KRAMER, R., LOOSEN, P., BEYER, E., HERZIGER, G. ILT Aachen. Charakterisierung und Diagnostik des Laserstrahles. ILT Aachen. 17 p.
- [25] - Der Laserstrahl - Analysator: Ein universelles Strahldiagnose-System für CW-Laser. Laser Optik Technologie GmbH.
- [26] - TAKEYAMA, Hidehiko. Automation Developments in Japan. IN: THIRD NORTH AMERICAN METALWORKING RESEARCH CONFERENCE, 3, 1975. *Anais* [S.l.: s.n.], 1975. p. 672-685.
- [27] - WZL TH. Vermeidung unbrauchbarer Spanformen. Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre der Rheinisch - Westfälischen Technischen Hochschule. Aachen: WZL.
- [28] - WZL TH. Positiouüberwachung und Kolisionsvermeideun bei Handbabungssystemen. Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre der Rheinisch - Westfälischen Technischen Hochschule. Aachen: WZL.

- [29] - VIEREGGE, G. Zerspanung der Eisenwerkstoffe. Editora Stahleisen, Düsseldorf, Alemanha. 1959.
- [30] - KÖNIG, Wilfried. Prof. Dr. Ing., Dr. h. c. Drehen, Fräsen, Bohren. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1981.
- [31] - MACHADO, Alisson Rocha. Influência da variação da relação ferrita/perlita na usinabilidade dos aços ABNT 1020 e ABNT 8620. Florianópolis, agosto de 1982. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica).
- [32] - SECO TOOLS DO BRASIL. Curso Básico de Usinagem.
- [33] - EHMER, H.J. Beitrag zur Ermittlung der Gesetzmässigkeiten und Ursachen der Freiflächenverschleiss an Hartmetallwerkzeug. Diss. TH Aachen 1970.
- [34] - WEINGAERTNER, Walter L. Usinagem a Quente de Aços Temperados. Florianópolis, Dezembro de 1978. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica).
- [35] - STEMMER, Caspar Erich. Ferramentas de corte : ferramentas simples de tornear. Florianópolis. Ed. da UFSC, 1989. 2. edição.
- [36] - KRONENBERG, Max. Grundzuege der Zerspanungslehre. Springer, Verlag. 1963.
- [37] - MEYER, K.F. Vorschub und Rückkräfte beim Drehen mit Hartmetallwerkzeugen. Dissertation TH Aachen. 1963.
- [38] - Recomendações de teste Stahl- Eisen.
- [39] - FERRARESI, Dino. Fundamentos da Usinagem de Metais. 5. Reimpressão. Edgard Blücher, v. 1. 751 p. São Paulo, 1977.

- [40] - HANDBOOK OF MACHINE TOOLS. Volume 3 -Automation and Controls. Machine Diagnostics in Automatic Production (Chapter 15). John Wiley & Sons.
- [41] - WECK, M., ALLDIECK, J. The Originating Mechanisms of Wheel Regenerative Grinding Vibrations. *Annals of CIRP*, v. 38, n. 1, p. 381-384, 1989.
- [42] - DAN, LI., MATHEW, J. Tool Wear and Failure Monitoring Techniques for Turning - A Review. *Int. J. Mach. Tools Manufacturing*. v. 30, n. 4, p. 579-598, 1990.
- [43] - GUINEA, D., BARRIOS, L. J., RUIZ, A., BETENCOURT, F. Multisensor information integration. *SENSOR* v. 10 n.3, July 1990.
- [44] - MICHELETTI, G. F., KONIG. W., VICTOR. H. R. In process tool wear sensors for cutting operations. *Annals of the CIRP*, v. 25, p. 483-496, 1976.
- [45] - JIANG, C., ZHANG, Y., XU, H. In-Process Monitoring of Tool Wear Stage by the Frequency Band-Energy Method. *Annals of the CIRP*, v. 36., p. 45-48 ,1987.
- [46] - BARRIOS, L. J., BETANCOURT, F., GUINEA, et al. State of the Art and Perspectives on Signal Processing Application to Machining Process Automation. In: PROCEEDINGS OF THE IAESTED INTERNATIONAL SYMPOSIUM SIGNAL PROCESSING & AND DIGITAL FILTERING, 1990, Lugano. *Anais...* Lugano: IAESTED, 1990. p. 210-213.
- [47] - INASAKI, I., AIDA. S., FUKUOKA. S. Monitoring System for Cutting Tool Failure Using an Acoustic Emission Sensor. *JSME International Journal*. v. 30, n.261, 1987.

- [48] - KEGG. Richard I. The Development of Sensors for Manufacturing Automation. Computers in Industry, v. 14, p. 123-129, 1990.
- [49] - TETI. Roberto. Tool Wear Monitoring Through Acoustic Emission. Annal of the CIRP, v. 38, n.1, 1989.
- [50] - LEE, L. C. A Study of Noise Emission for Tool Failure Prediction. Int. J. Mach. Tools Manufact., v. 26, n.2 p. 205-215. 1986.
- [51] - MENDIZABAL, Ramiro O. Arroyo. Monitoramento do Processo de Retificação de Precisão através de Técnicas Acústicas. São Carlos, maio de 1991. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica).
- [52] - KÖNIG, Wilfried. Prof. Dr. Ing., Dr. h. c. Schleifen, Honen, Lappen. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1980.
- [53] - OLIVEIRA, João Fernando Gomes de. Análise de Ação do Macroefeito de dressagem de rebolos no desempenho do processo de retificação. São Carlos, 1988. Tese (Doutoramento em Engenharia Mecânica).
- [54] - BIERLICH, R. Analysen und Methoden zur Messung von Prozesskengrossen an Schleifemaschinen. Untersuchung des WZL, TH Aachen, 1975.
- [55] - BIERLICH, R. Technologische Voraussetzungen Zum Aufbau eines Adaptiven Regelungs Systems beim Aussenrundeinstechschleifen. Diss. TH Aachen 1976.
- [56] - BÖTTLER, E. Konzept und technologische Grundlagen zum Aufbau eines Informationszentrums für die Schleifbearbeitung. Diss. TH Aachen, 1976.

- [57] - HONSCHEID, Willi. Diplom - Ingenieur. Abgrenzung werkstoffgerechter Schleifbedingungen für die Titanlegierung Ti Al 6 V 4. Aachen, märz 1975.
- [58] - MALKIN, S., u R.B. ANDERSON. Termal Aspects of Grinding Part 1 Energy Partition. Trans. ASME, 96 (1976) 11, S.1178-n.89.
- [59] - SCHOFIELD e KHUOBIN
- [60] - SPERLING, F. Grundlegende Untersuchungen beim Flachsleifen mit hohen Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeiten und Zerspanleistungen. Diss. TH Aachen, 1970.
- [61] - SCHOFIELD e TRIPATI
- [62] - BRINKSMEIER, E. Prediction of Tool Fracture in Drilling. Annals of the CIRP, v. 39, p. 97-100, 1990.
- [63] - WZL TH. Überwachung beim Spitzenlossleifen. Aachen: WZL.
- [64] - RUIZ. A., GUINEA. D., BARRIOS. L. J., BETANCOURT. F. An Empirical Multi-sensor Estimation of Tool Wear. [S.1 : s.1]. 31 p.
- [65] - KUTZNER, K, SCHEHL, U. Werkzeugüberwachung von Bohrern keinen Durchmessers mit Körperschallsensoren. Industrie-Anzeiger, v. 82, 1988.
- [66] - WZL TH. Schleifprozessüberwachung mit Koerperschall. Aachen: WZL, 1990. 1 f.
- [67] - WZL TH. Abrichtüberwachung. Aachen: WZL, 1989.
- [68] - CONSTANTINIDES, N., BENNETT, S. An Investigation of Methods for the On-Line Estimation of Tool Wear. Int. J. Mach. Tools Manufact., v. 27, n.2, p. 225-237, 1987.

- [69] - SANDVIK. TOOL MONITOR SYSTEM:CURRENT SENSOR. Vierheim :
SANDVIK COROMANT. 1986.
- [70] - FINCH. Jeffrey l. , KLINE. William A. Application Issues
for Tool Monitoring Systems on Lathes. SME- Tool and
Machine Condition Monitoring Conference. Chicago,
Illinois. August 21-22, 1990.
- [71] - SANDVIK. Tool Monitoring System : Feed Force Sensors.
Vierheim :SANDVIK COROMANT. 1984
- [72] - PROMETEC. Process Monitor K300 and K302. Aachen: PROMETEC
GmbH. 1990.
- [73] - PROMETEC. Tool Monitor T300 and T302/TM300 and TM302.
Aachen: PROMETEC GmbH. 1990.
- [74] - MONTRONIX. TS TOOL SENSOR. Raleigh: MONTRONIX, 1989. 13 p.
- [75] - GUENTHER & CO. Titex Plus - Tool Control : Die
"Systemlösung zur sicheren Werkzeugüberwachung."
Frankfurt : Günther & Co, 1990.
- [76] - CHRYSSOLOURIS, G. et al. Controle de manufatura com
sensores múltiplos ou não. Máquinas e Metais. p. 46-47,
Nov. 1991.
- [77] - RUIZ, A., BETANCOURT, F., GUINEA, D., BARRIOS, L.J.
Extraccion de Caracteristicas Sensoriales para la
percepcion Artificial. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE
CONTROL AUTOMATICO. Anais... Puebla : AMCA, 1990. p.
714-719.
- [78] - RUIZ, A., BETANCOURT, F., GUINEA, D., BARRIOS, L.J.
Discriminat Analysis Techniques in Multisensorial Tool
Wear Estimation. In: PROCEEDINGS OF THE IASTED
INTERNATIONAL SYMPOSIUM APPLIED INFORMATICS, 8, 1990,
Innsbruck. Anais... Innsbruck, 1990, p. 415-418.

- [79] - BETANCOURT F., CHAM J. C., BARRIOS L. J., GUINEA D., RUIZ A. A Comparative Analysis of Expert Systems for Tool Wear Monitoring in Cutting Processes. Zurich : IAESTED.
- [80] - GUINEA. D., RUIZ, A. et al. Multi-Sensor Integration: Automation Frature Selection and State Identification. In: THE CIRP WORKSHOP SEMINARS OF THE INTELIGENT MANUFACTURING SYSTEMS SEMINARS ON LEARNING IM IMS, 1, 1991, Budapest. Anais... Budapest : CIRP, 1991, p. 158-175. Inclui tabela of contents.
- [81] - RUIZ, A., BETANCOURT, F., GUINEA, D. et al. An Experimental Design in Metal Cutting. In: PROCEEDINGS OF THE IAESTED INTERNATIONAL SYMPOSIUM APPLIED INFORMATICS, 8, 1990, Innsbruck. Anais... Innsbruck : IAESTED, 1990, p. 419-422.
- [82] - GUINEA, D., BARRIOS, L. J., BETANCOURT, F., RUIZ, A. Modelo Estadístico para el Desgaste de una Herramienta de Corte. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CONTROLE AUTOMATICO, 4, 1990, Puebla. Anais... Puebla : AMCA, 1990. P. 164-168.
- [83] - BARRIOS, L., BETANCOURT, F. et al. Multisensorial Data Analysis in a Cutting Process. [s.1] : IAESTED, 1989.
- [84] - DORNEFELD, David A. Neural Network Sensor Fusion for Tool Condition Monitoring. Annals of the CIRP, v. 39, p. 101-105, 1990.
- [85] - SPIEWAK, S., WU, S. M. Tool Wear Monitoring and Breakage Detection Based on " Intelligent Filtering ". Int. J. Mach. Tools Manufact., v. 28, n.4, p. 483-494, 1988.
- [86] - HORN, David. Smarter Sensors Respond to Factory Stimuli. MECHANICAL ENGINEERING, p. 64-67, Sept. 1989.

- [87] - CHRYSSOLOURIS, G., WRIGHT, K. Knowledge-Based Systems in Manufacturing. Annals of the CIRP, v. 35, n. 2, p.437-440, 1986.
- [88] - PREISS, K. Artificial Intelligence and its Potential Use in the Manufacturing System. Annals of the CIRP, v. 35, n.2, p., 425-432, 1986.
- [89] - SHOLENIUS, G., KJELLBERG, T. Artificial Intelligence and its Potential Use in the Manufacturing System. Annals of the CIRP, v. 35, n. 2, p. 425-432, 1986.
- [90] - PROMETEC. Process Monitor GD 200, G200 und D 200. Aachen: PROMETEC, 1988.
- [91] - PROMETEC. STARTING UP MANUAL - PROCESS MONITOR GD 200, G 200 AND D 200. Aachen: PROMETEC, 1989.
- [92] - PROMETEC. OPERATING MANUAL - Process Monitor GD 200, G 200 und D 200. Aachen: PROMETEC, 1989.
- [93] - PROMETEC. TOOL MONITOR SYSTEM AND PROCESS MONITOR SYSTEM. Aachen: PROMETEC 1988.
- [94] - PROMESS. TOOL INFORMATION SYSTEMS FOR LATHES. PROMESS.
- [95] - PROMESS. INTELLIGENT TRANSDUCERS. PROMESS.
- [96] - PROMESS.PRODUCTION INFORMATION - Werkzeugüberwachung für Drehmaschinen. PROMESS.
- [97] - PROMESS. PRODUCTION INFORMATION - Werkzeugüberwachung für Bohrmaschinen. PROMESS.
- [98] - PROMESS. PRODUCTION INFORMATION - Qualitäts - und Werkzeugüberwachung. PROMESS.
- [99] - BRANKAMP. Systems for Process Monitoring of Punching or Stamping Presses. Erkrath: BRANKAMP GmbH. 1991.
- [100] - BRANKAMP. Processa 2531/2531 MS. BRANKAMP GmbH. 1991.
- [101] - BRANKAMP. Processa 2040-R/2040-A/R. BRANKAMP GmbH. 1991.

- [102] - BRANKAMP .Processa 2050/2060. BRANKAMP GmbH. 1991.
- [103] - BRANKAMP.Processa 2531/2532 Z. BRANKAMP GmbH. 1991.
- [104] - BRANKAMP. Processa 4010/4030. BRANKAMP GmbH. 1991.
- [105] - BRANKAMP. Processa 4040. BRANKAMP GmbH. 1991.
- [106] - BRANKAMP. Processa CCS. Erkrath: BRANKAMP GmbH. 1991.
- [107] - BRANKAMP. Processa 3040 ST. Erkrath: BRANKAMP GmbH. 1991.
- [108] - BRANKAMP. Processa 3040-A. Erkrath: BRANKAMP GmbH. 1991.
- [109] - BRANKAMP. Processa 3040-R. Erkrath: BRANKAMP GmbH. 1991.
- [110] - BRANKAMP. Quality Assurance Systems. Erkrath: BRANKAMP GmbH. 1991.
- [111] - BRANKAMP. Prozessüberwachung in der Spanenden Fertigung. Erkrath: BRANKAMP GmbH.
- [112]- BRANKAMP. WIDATRONIC: Werkzeugüberwachungs-Systeme für Kollision, Bruch und Verschleiss. Erkrath: BRANKAMP GmbH.
- [113] - SANDVIK. TM2000 PROCESS MONITORS for Force, Torque and Power Sensing Systems TMS: 011. Viernheim: Sandvik, 1989.
- [114] - SANDVIK. TOOL MONITOR SYSTEM: PLATE SENSOR TMS: 7 EMO. Viernheim: Sandvik, 1988.
- [115] - Manual da Retificadora Studer.
- [116] - GORGES, Marzely. Relatório Interno LMP/EMBRACO. 1992.
- [117] - DZOMBAK, I., KLINE, W. A. System Design for In-Process Tool Monitor. In: Machine Monitoring Sensors, 1989, Detroit. 1989. Annals... Carolina: Kennametal.
- [118] - VARMA, Ashok H., KLINE, William A. Force Transducer Applications on CNC Lathes. SOCIETY OF MANUFACTURING ENGINEERS, ADVANCED MACHINING TECHNOLOGY CONFERENCE, 3, 1990. Annals... [S.1 : s.1], 1990, p.1-22.
- [119] - MONTRONIX. TS 2000 TOOL MONITOR. MONTRONIX, 1990.

- [120] - MONTRONIX. Montronix TCS... Selbstlernende und Software-gesteuerte Werkzeugüberwachung auf Drehmaschinen. Latrobe: MONTRONIX, 1987.
- [121] - MONTRONIX. TS 200 W TOOL SENSOR. User's Guide. Raleigh: MONTRONIX, 1989.
- [122] - MONTRONIX. MONTRONIX ATM... State-of-the-art breakage monitor for rotating tools. Raleigh: MONTRONIX, 1989. 3 p.
- [123] - MONTRONIX: Sistema di Controllo Rottura per Utensili Rotanti. Latrobe: MONTRONIX, 1987. 3 p.
- [124] - Ein Werkzeug mit Gefühl. Fertigungstechnik, n. 46, p.8-9, 1989.
- [125] - SAMCO. WERKZEUG- UND- MASCHINEN- ÜBERWACHUNG. Berlin: SAMCO AUTOMATION GmbH, 1990.
- [126] - KLUFT, W. Kraftsensoren überwachen Werkzeuge und Maschine: Dynamische Schwellen verhindern Folgeschaden. Prometec GmbH Aachen , 1988.
- [127] - WEINGAERTNER, W. L., SCHROETER, R. B., Tecnologia de Usinagem e suas Ligas. 1. edição, São Paulo: Alcan Alumínio do Brasil, 1990.
- [128] - SCHROETER, R. B, Alargamento de Precisão em Alumínio Aeronáutico com Ferramentas de Gume Único Regulável. Florianópolis, outubro de 1989. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica).
- [129] - Preisübersicht Process Monitore Schleifmaschinen. Prometec GmbH. 1990.

BIBLIOGRAFIA AUXILIAR

- [130] - VALENITE-MODCO. POWER MONITOR MODELLO 720 E MODULO DI
SUPPORTO ISO-WATT. Milano: Valenite, 19--.
- [131] - DEUTSCHES INSTITUTE FÜR NORMUNG. Fertigungsverfahren, DIN
8580, Juni, 1974.
- [132] - VERKERK, J. Manufacturing Technology. annals of the CIRP,
1977.
- [133] - SANDVIK - Coromant, Ferramentas para tornear.
- [134] - SOCIETY OF MANUFACTURING ENGINEERS. Tool and Manufacturing
Engineers Handbook. Volume 1, Michigan.
- [135] - NUSSBAUM, Guillaume Ch. Rebolos & Abrasivos : tecnologia
básica. São Paulo, Icone, 1988.
- [136] - QUEIROZ, Abelardo Alves de. Usinabilidade do ferro
fundido cinzento e avaliação da temperatura e força de
corte com sensores de desgaste. Florianópolis, agosto
de 1976. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica).
- [137] - VARLIK, Mehmet. Optimierte Prozessführung beim
Aussenrundeinstechschleifen. Aachen, sept. 1987.
- [138] - MESSER, Johannes. Abrichten Konventioneller
Schleifscheiben mit stehenden Werkzeugen. Aachen,
feb. 1938.
- [139] - LAUER-SCHMALTZ, Hans. Zusetzung von Schleifscheiben.
Aachen, dez. 1979.
- [140] - NETTERSCHIED, Thomas. Rechnerunterstützte externe
Schnittwertoptimierung beim
Aussenrundeinstechschleifen. Aachen, dez. 1948.

- [141] - SALIJW, E., PAULMAN, R. Relations Between Abrasive Processes. Technische Universität Braunschweig - Germany, Annals of the CIRP, 1987.
- [142] - PEDERSEN, Kjeld Bruno. Wear Measurement of Cutting Tools by Computer Vision. Int. J. Mach. Tools Manufact., v. 30 N: 1, p. 131-139, 1990.
- [143] - KÖNIG, W., VARLIK, M, Höhere Fertigungssicherheit durch die Überwachung des Abrichtprozesses. HGF 86/75.
- [144] - MEYEN, H. P., KÖNIG, W. Sensorgestützte Prozess - und Qualitätsüberwachung beim Schleifen. Aachen: WZL. Cópia xerox do documento em parte das páginas 441-456.
- [145] - HAGEN, W, W, Adolf, Schmieden in Hannover. München 1990.
- [146] - WZL TH. Überwachungssysteme für die Drehbearbeitung mit indirekten Kraftsensoren. Aachen: WZL, 19--.
- [147] - WZL TH., Überwachungssysteme für die Fräsbearbeitung. Aachen: WZL.
- [148] - WZL TH. Überwachungssysteme für die Bohrbearbeitung. Aachen: WZL, 1990.
- [149] - WZL TH. Überwachungssysteme für die Drehbearbeitung. Aachen: WZL, 1990.
- [150] - LIN, Z. H., HODGSON, D. C. In-Process Measurement and Assessment of Dynamic Characteristics of Machine Tool Structures. Int. J. Mach. Tools Manufact., v. 28, N. 2 p. 93-101, 1988.
- [151] - ROSEN, Jerome, On-Line Monitoring of Wear. Mechanical Engineering, p. 92-96, Oct. 1989.
- [152] - BETTS, Kellyn S. Process Control Takes Command. Mechanical Engineering, p. 64-68, July 1990.

- [153] - LEE, L. C., LEE, K. S. et al. On the Correlation Between Dynamic Cutting Force and Tool Wear. Int. J. Mach. Tools Manufact., v. 29, n. 3, p. 295-303, 1989.
- [154] - ALTINTAS, Yusuf. In-Process Detection of Tool Breakages Using Time Series Monitoring of Cutting Forces. Int. J. Mach. Tools Manufact., v.28, N. 2, p. 157-172, 1988.
- [155] - LEHMANN-METTHAEI, Björn, Passgenaue Sicherheit beim Einpressen durch elektronische Steuerung und Überwachung. Werkstatt und Betrieb 123 (1990) 11,
- [156] - DOEMENS, Günter, MENGEL, Peter, ZIEGNER, Ralf, Werkstücke mit 3D-Sensoren geometrie-unabhängig erkennen. Werkstatt und Betrieb 123 (1990) 6,
- [157] - English translation by HITOMI, K, Manufacturing Systems Engineering.
- [158] - GUINEA, D., RUIZ, A. et al. Piel neumática para robots. Automatica e Instrumentacion, p. 141-146, Julio de 1990.
- [159] - ROCHA, A. S. Determinação de um Modelo de Força de Usinagem para a Furação, a partir do Modelo de Força de Usinagem do Torneamento. Florianópolis, fevereiro de 1985. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica).
- [160] SCHNEIDER, C. A. Apostila de Técnicas de Pesquisa Experimental. Florianópolis - UFSC.
- [161] - INASAKI, I., Monitoring System for Cutting Tool Failure Using an Emission Acoustic Sensor.
- [162] - KEGG, Richard L. The Developments of Sensors for Manufacturing Automation.

- [163] - SCHAPERMEIER, E. et al. Verschleiss Prozessbegleitend Messen. Werkstatt und Betrieb, München, v. 122, n. 9, jah. 1989.
- [164] - VERLAG, Carl Hanser. Verschleiss prozessbegleitend messen. Werkstatt und Betrieb - 122, Jahrgang 1989/9, München.
- [165] - MANNAN, M. A., BROMS, S. Monitoring and Adaptive Control of Cutting Process by Means of Motor Power and Current Measurements. Annals of the CIRP, v. 38, n.1, p. 347-350, 1989.
- [166] - BRINKSMEIER, E. A Selftuning Adaptive Control System for Grinding Processes. Annals of CIRP, v. 40, n.1, p.355-358, 1990.
- [167] - INASAKI, I. Monitoring and Optimization of Internal Grinding Process. Annals of the CIRP, v. 40, n.1, p. 359-362, 1991.
- [168] - SPIEWAK, S. A Predictive Monitoring and Diagnosis System for Manufacturing. Annals of CIRP, v. 40, n.1, p. 401-404, 1991.
- [169] - DORF, Richard C. Modern Control Systems. University of Santa Clara, Ed, Addison-Wesley Publishing Company, INC, 387 p, 1967.
- [170] - ESSEL, K. Entwicklung einer Optimierregelung für das Drehen. Diss, TH Aachen, 1972.
- [171] - OTTO, F. Entwicklung eines gekoppelten AC-Systems für die Drehbearbeitung. Diss, TH Aachen, 1976.
- [172] - HANSEL, w. Beitrag zur Technologie des Drehprozesses im Hinblick auf Adaptive Control. Diss, TH Aachen, 1974.

- [173] - LANGHAMMER, K. Die Zerspankraftcomponenten als Kengrossen zur Verschleissbestimmung an Hartmetall-Drehwerkzeugen. Diss. TH Aachen, 1972.
- [174] - CINCINNATI MILACRON Manual Retificadora.
- [175] - WEINGAERTNER, W. L., GORGES, M. et al. Desenvolvimentos tecnológicos na fabricação de precisão da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis: LMP, 1991.
- [176] - ROSA, Edison da. Sistemas CAE/CAD/CAM. Florianópolis, 1990.

ANEXO 1

Descrição do Monitor de Processo GD 200, G 200 e D 200

1 Propriedades do Sistema de e Faixa de Aplicação.

No monitor de processo GD 200 tem-se um sistema para o monitoramento de retificadoras. O equipamento monitora de forma abrangente o processo de retificação e o dressamento através de uma avaliação automática do nível de ruído da máquina ferramenta. O monitor de processo G 200 monitora exclusivamente o processo de dressamento.

O sinal acústico é analisado até frequências de 100 kHz ou mais e através de uma filtragem adequada é preparado de forma que se tenha uma relação máxima de aproveitamento por sinal perturbador. O ruído do sinal perturbador de motores, engrenagens, rolamentos e guias, etc., são amortecidas e com isso minimizadas.

2 Dados Técnicos, Dimensões e Conexões do Equipamento.

2.1 Monitor de Processo GD 200

- Ajustagem automática do nível de ruído 100 % da máquina ferramenta (processo normal de trabalho) e armazenagem do referido fator de amplificação da função TEACH-IN central, respectivamente separado para o processo de retificação e de dressamento.
- Compensação automática do nível de dressamento no ar em 0 %.

- 3 acima do limite (100 - 300 %) e 1 abaixo do limite (0 - 100 %) e 2 abaixo do limite (0 - 100 %) para o monitoramento do dressamento.
- Comuta o monitoramento de retificação para o de dressamento através do CLP.
- A existência de um valor standart do limite sobre o campo de operação regulável.
- Tempo de reação bastante curto do mais alto limite de 5 ms.
- O tempo standart existe de reação dos outros limites sobre o campo de operação regulável.
- Leituras searadas e saídas dos contactores do potencial livre dos limites separados (isolados).
- Possibilidade de inativação dos limites 2 até 4 através da aproximação CLP por marcha rápida.
- Reconhecimento de um número máximo de passos para o dressamento com saídas dos contactores separados.
- Possibilidade de interrupção do monitoramento do dressamento através da aproximação CLP.
- Leituras analógicas dos sinais dos níveis de ruído.
- Leituras do estado do processo (IP) e de alarme (AL).
- Entrada exata e leituras possíveis dos valores limites, os tempos de reação e os fatores de amplificação sobre a botoeira e uma leitura digital com 3 indicações de posição.
- Teste automático de todo o sistema junto com a leitura de avaria (falha) (ER) e das referidas saídas dos contactores.
- Armazenamento de dados com perda da corrente elétrica.
- Campo de operação na indústria qualificada da técnica da película com pequenos desvios.
- Sensor acústico robusto e com central de refrigeração maciça,

D = 30 mm, H = 24 mm fixado com um parafuso M6.

- Carter protetor robusto e com central de refrigeração maciça para o pré-amplificador, protetor IP 68, dimensões: 90 x 34 x 64 mm³ (B x H x T).

- Os aparelhos de mesa são carteres fechados para meio ambientes poluídos com corretores de ficha com execução de boa qualidade (alto rendimento). A interface para o CLP está montada, Protetor IP 54, Dimensões: 341 x 133 x 250 mm³ (B x H x T).

- A execução de montagem do aparelho consiste em 2 partes que são a parte da rede com interface para CLP, Dimensões: 270 x 112 x 60 mm³ (B x H x T) e o campo de operação com a unidade de monitoramento, dimensões: 305 x 128 x 53 mm³ (B x H x T).

Conexão para o Monitor de Processo GD 200, G 200, D 200.

Rede: 220 V e/ou 110 V, 50-60 Hz, 55VA.

Conexão: paralela, livre potencial para a interface para CLP e para o acionamento de penetração.

Pré-amplificador: Cabo de junção blindado sextuplo (6 fios) para o monitoramento do aparelho, sinal de saída 0-10 V.

Sensor- Estático: Cabo especial de 2 fios com entrançado metálico para o pré-amplificado, 7 mm longo.

ANEXO 2

As informações obtidas através dos fabricantes de sistemas de monitoramento são as seguintes:

PROMESS GmbH: Primeiro lugar no mercado norte-americano com um montante de 40 % dos sistemas instalados.

Utiliza como estratégia de monitoramento o modelo de Limites Estáticos com a técnica "Teach-In" com sensor piezelétrico [8,94-98], que pode ser plataforma, bucha ou rolamento. Possuindo ainda a possibilidade de projeto de um novo sensor para as necessidades do cliente com um baixo custo [94].

Este sistema de monitoramento tem aplicação nos processos de torneamento e furação, reconhecendo desgaste e quebra [8,96-98].

MONTRONIX Inco: Obtém a segunda posição no mercado norte-americano com 30 % dos sistemas instalados. Como estratégia de monitoramento utiliza o modelo de Limites Estáticos com reconhecimento de padrões [8,118]. Possui basicamente dois tipos [7,119-122]:

1- Sistema TS: O sistema é baseado na medição da força em três eixos ortogonais usando células de carga de quartzo (plataforma piezelétrica). Este sistema aplica-se somente para o monitoramento do processo de torneamento:

De pastilhas de cerâmica ou de metal duro

Na usinagem de materiais variando de aços ao carbono, FoFo até super ligas a base de níquel.

Em corte interrompido

Em tornos com 2 e 4 eixos

Em tornos verticais e horizontais

Na indústria automobilística, aeronáutica e na usinagem pesada.

O monitoramento da colisão é feito através de um limite estático que pode ser modificado em função da operação a se realizar. Quando este limite é ultrapassado (Colisão) o sistema reconhece e envia um sinal de parada de avanço em 3 ms.

O limite de ferramenta não cortando também é um limite estático ajustável.

A análise da quebra da ferramenta é feita através da comparação da força de corte com um padrão de quebra. Há mais de um padrão memorizado. Isto é necessário pois uma ferramenta, por exemplo, de metal duro apresenta um padrão de quebra diferente de uma de cerâmica. Padrões também são memorizados para cortes interrompidos.

O sistema é digital, e seus parâmetros de ganho e sensibilidade podem ser alterados no painel. O tempo de resposta deste sistema a uma quebra é de 10 ms.

O sistema de monitoramento do desgaste é via uma estimativa de três forças de corte. Pela relação entre elas pode-se determinar o desgaste evitando o problema de picos de força devido a incrustações ou aumento da profundidade de corte. O nível de desgaste pode ser alterado em função do desejado.

Todos os três modelos utilizam a mesma plataforma de sensoreamento.

TS 200C

Monitor de colisão e ferramenta não cortando

Contador de ciclos

Possui interface paralela e serial para CNC

TS 200 B

Monitor de colisão, ferramenta não cortando, quebra.

Possui interface paralela e serial para CNC

TS 200 W

Monitor de colisão, ferramenta não cortando, quebra, desgaste.

Possui interface paralela e serial para CNC.

e

2 - Sistema de Controle de Ruptura de Ferramenta Rotativa: Empregado em furadeiras e fresadoras para detectar a ruptura da ferramenta via um sensor de emissão acústica (AE), que é fixado na mesa da máquina.

A fim de se regular a sensibilidade, pois cada sistema de fixação de peça é diferente, existe um gerador de impulso, fixado na peça a trabalhar, que gerará uma frequência semelhante a de ruptura. Este ajuste de sensibilidade é importante, pois cada fixação se comporta diferentemente quanto a absorção do ruído de usinagem.

VALENITE MODCO: Terceiro no mercado norte-americano com 500 sistemas instalados por ano para o processo de furação e alguns para o torneamento. Utiliza como sensor o de potência [8,130].

BRANKAMP GmbH: Maior número de seus sistemas estão instalados nos Estados Unidos. No ano de 1990 transferiu sua tecnologia para a Firma Schneider GmbH, saindo do mercado de monitoramento de usinagem e passou a atuar no mercado com sistemas de monitoramento para o processo de conformação [99-112].

Os sistemas já instalados operam segundo o modelo de Limites Estáticos (Teach-In) [8,22,112].

Apresenta um sistema básico, WIDATRONIC [112], em várias versões e possuem um transdutor de medição indireta das forças na máquina ferramenta, o sensor indutivo magnético, que monitora o momento torçor. Estes podem ser: Buchas de medição ou Plataforma de medição piezelétrica.

Para o reconhecimento da quebra o processo é avaliado dinamicamente através de uma análise de frequência

- BCS: - Quebra da ferramenta
- Colisão

Existe um limite de segurança contra colisão para todas as operações de torneamento.

- WCS-BCS: - Desgaste
- Quebra
- Colisão

Para fabricação de peças seriadas com grande variação de peças. Empregado somente para o processo de Torneamento.

É determinado a variação máxima da força sobre um número fixo de peças durante a usinagem, através de uma medição integrada da força para ferramentas novas. Em decorrência destas forças maximizadas calcula-se um novo valor final para a força.

Teach-In: Determina os parâmetros característicos para o processo.

Controle: Monitoramento otimizado do processo.

Verify : Peças com contornos, mas de materiais diferentes.

Service: Implantação do sistema e manutenção.

- BCS-R: - Quebra
- Colisão

Empregado para Centros de Usinagem e Ferramentas Rotativas, onde mede a componente da força de usinagem.

Um computador analógico analisa o sinal e transmite para o microcomputador para cada etapa de trabalho com um sinal apreendido no sistema.

- CCS: Monitora somente a colisão
- WIDATRONIC 8030

Utiliza programas especiais de avaliação

- Funções de memória
- Análise de tendência
- Representação de valores mínimos e máximos.

Pré-alarme: - Ultrapassagem dos limites de força através de desgaste.

- Limite Zero: Ausência de ferramenta.

Função Auto: - Monitoramento do processo na primeira peça.

- Funções de diagnóstico e rotina de auto-teste até o controle das funções do sensor.

Este modelo ainda possui:

- Display LCD Gráfico: Representação gráfica das variações medidas.
- Função Memory: As informações dos últimos 28 componentes fabricados estão disponíveis para cada ferramenta.

Reconhece variações isoladas

Desloca os limites para o display gráfico.

Este modelo tem aplicação nas seguintes situações:

- Peças extrudadas
- Peças fabricadas a partir de material de barra
- Peças pré-usinadas

- Furação.

GUNTHER Co.: Na faixa de 100-150 sistemas instalados. 85 % para o processo de furação. Também transferiu sua tecnologia para a Firma Hoffman GmbH, pelo fato de apresentar vendas inadequadas.

Possui o sistema TITEX PLUS TOOL CONTROL DWM [02,8,22,75], que trabalha com o modelo com limites estáticos (Teach-In) e sensor indutivo magnético.

Este sistema pode ser aplicado para o reconhecimento da colisão, quebra, desgaste e falta de ferramenta nos seguintes processos: - Torneamento

- Furação
- Fresamento
- Retificação.

SANDVIK COROMANT: Em 10 anos instalou 1700 sistemas, sendo 85 % destes para o processo de furação.

O modelo com limites estáticos (Teach-In) é o mais utilizado como estratégia de monitoramento para as funções de desgaste, quebra, colisão e falta de ferramenta no Sistema TM2000 [69,71,113-114]. Dependendo do sensor que é utilizado pode-se monitorar os seguintes processos:

- Com sensor de força: Torneamento, Furação, Máquinas especiais.
- Com sensor de potência: Torneamento, Fresamento, Furação, Retificação e Serrramento.
- Com sensor de Torque: Furadeira, Tornos CNC, Centros de usinagem e Máquinas especiais

Reconhecendo: Colisão, Quebra, Desgaste e Falta de Ferramenta ou Peça.

SAMCO AUTOMATION GmbH: Empresa alemã que possui o sistema MIMATIC E-2 (figura 74) com sensor indutivo magnético e utiliza a técnica de Reconhecimento de Padrões como modelo de monitoramento [124-125]. Os dados necessários para a pré-regulagem são os dados sobre a broca, material da peça, avanço e rotação da ferramenta (v_c). O processamento é feito permanentemente durante o processo de usinagem e fornece valores de desgaste para o controle da quebra.

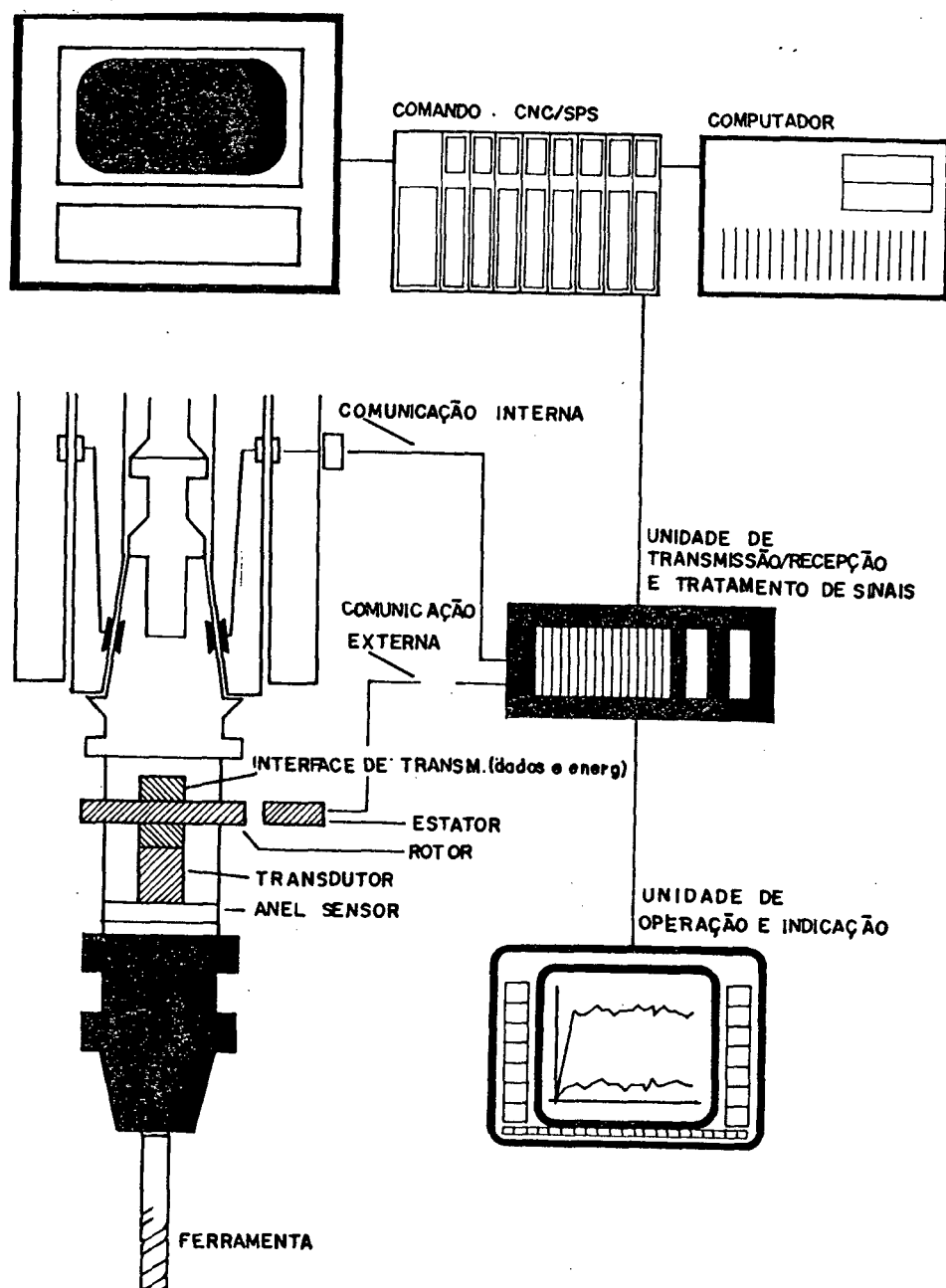


FIGURA 74: Sistema Mimatic E-2 [125].

Complementarmente, o sistema de monitoramento fornece informações na forma de valores medidos, protocolos e estatísticas que servem para a otimização complementar do processo.

Tem aplicação nos processos com ferramenta rotativa em máquinas multifusos e monofusos.

Permite monitorar ferramentas com diâmetro de até 1 mm com confiabilidade, porém para cada ferramenta é necessário um novo adaptador, o que eleva o custo deste sistema.

Sensores captam as componentes dinâmicas que atuam sobre a ferramenta e as transmitem para uma cápsula de medição no interior da ferramenta. Aqui os sinais são preparados e de forma digitalizadas são transmitidos para uma estação estacionária (receptor) em alta frequência. Esse receptor está acoplado com a unidade de processamento para o reconhecimento do desgaste ou da quebra.

A instalação do sensor deste sistema, que é uma bobina indutiva, só pode ser efetuada em máquinas-ferramentas novas, pois é necessário executar trabalhos de furação e erosão na árvore da máquina, o que é muito difícil de ser executado em árvores já concebidas. Outro problema é o custo do sistema. Para cada tipo de ferramenta é necessário a fabricação de um sensor específico para esta [22].

PROMETEC GmbH: Em 5 anos instalou 1150 sistemas [90-93].

Para detecção de quebra, desgaste e falta de ferramenta e colisão da máquina ferramenta para as operações de torneamento, furação e fresamento distinguimos duas estratégias de monitoramento dentro da Técnica Teach-In, sejam com monitoramento

com limites dinâmicos (Tool Monitor System) e limites estáticos (Process Monitor System) e para a retificação somente com limites estáticos.

Para o processo de retificação o sensor utilizado é o de ruído e para os demais processos citados acima operam com sensores piezelétricos.

TOOL MONITOR SYSTEM

T300 : Todas as funções, todos os processos de torneamento e furação.

M300 : Todas as funções, todos os processos de fresamento e furação.

TM300: Todas as funções, todos os processos de torneamento, furação e fresamento.

PROCESS MONITOR SYSTEM

K100 : Apenas reconhecimento de colisão para todos os processos de usinagem.

K200 : Todas as funções, furação, furação escalonada, furação profunda, escareamento e sangramento.

K300 : Todas as funções, todos os processos de usinagem.

GD200: Retificação e dressamento.

G200 : Retificação.

D200 : Dressamento.